

Metode analisis stabilitas lereng statik bendungan tipe urugan





© BSN 2016

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh isi dokumen ini dengan cara dan dalam bentuk apapun serta dilarang mendistribusikan dokumen ini baik secara elektronik maupun tercetak tanpa izin tertulis dari BSN

BSN
Email: dokinfo@bsn.go.id
www.bsn.go.id

Diterbitkan di Jakarta

Daftar isi

Daftar isi.....	i
Prakata	iii
Pendahuluan.....	iv
1 Ruang lingkup.....	1
2 Acuan normatif.....	1
3 Istilah dan definisi	1
4 Kondisi pembebanan dan faktor keamanan	2
5 Kuat geser material.....	7
6 Perhitungan tekanan air pori.....	13
7 Analisis stabilitas lereng	14
Lampiran A Penentuan parameter bahan timbunan untuk analisis stabilitas lereng	18
Lampiran B Contoh analisis stabilitas bendungan Jatibarang (informatif).....	19
Bibliografi.....	28
Gambar B.1 - Penampang geologi fondasi bendungan.....	19
Gambar B.2 - Stratifikasi fondasi berdasarkan parameter hasil uji lapangan.....	19
Gambar B.3 - Profil bendungan Jatibarang, Jawa Tengah dengan asumsi fondasi kuat.....	20
Gambar B.5 - Gradasi zona semi kedap air (2)	20
Gambar B.4 - Gradasi zona inti kedap air (1)	20
Gambar B.6 - Grafik $p - q$ bahan urugan 1	21
Gambar B.7 - Grafik $p' - q$ bahan urugan 1.....	21
Gambar B.9 - Grafik $p' - q$ bahan urugan filter 2.....	21
Gambar B.8 - Grafik $p - q$ bahan urugan filter 2.....	21
Gambar B.10 - Grafik hubungan σ_3 'dengan ϕ '.....	21
Gambar B.11 - Hasil analisis stabilitas lereng udik selesai konstruksi	23
Gambar B.12 - Hasil analisis stabilitas lereng hilir selesai konstruksi	23
Gambar B.13 - Hasil analisis stabilitas lereng udik kondisi aliran langgeng	24
Gambar B.14 - Hasil analisis stabilitas lereng hilir kondisi aliran langgeng	24
Gambar B.15 - Hasil analisis stabilitas lereng udik kondisi surut cepat.....	25
Gambar B.17 - Jenis material model hiperbolik untuk analisis tegangan regangan.....	26
Gambar B.16 - Jenis material model Mohr Coulomb untuk analisis tegangan regangan.....	26
Gambar B.18 - Deformasi jaring elemen hingga kondisi selesai konstruksi.....	26
Tabel 1 - Persyaratan faktor keamanan minimum untuk stabilitas bendungan tipe urugan ...	6
Tabel 2 - Karakteristik tanah sebagai bahan timbunan dan fondasi bendungan.....	9

Tabel 3 - Parameter pemadatan tanah lempung di Indonesia (NAJOAN 1990).....	10
Tabel 4 - Kuat geser bahan urugan lempung di Indonesia (NAJOAN 1990)	10
Tabel 5 - Analisis stabilitas dengan cara keseimbangan batas	15
Tabel 6 - Program elemen hingga yang dapat digunakan untuk analisis	16
Tabel A.1 - Ikhtisar pengujian bahan urugan tanah untuk penentuan parameter desain untuk analisis stabilitas	18
Tabel B.1 - Gradasi zona urugan batu.....	20
Tabel B.2 - Parameter yang digunakan untuk analisis stabilitas lereng	22
Tabel B.3 - Hasil analisis stabilitas lereng bendungan Jatibarang.....	22



Prakata

Standar Nasional Indonesia (SNI) tentang “Metode analisis stabilitas lereng statik bendungan tipe urugan” disusun untuk memberikan keseragaman dalam analisis stabilitas lereng statik bendungan tipe urugan dengan mempertimbangkan kondisi pembebanan, sifat teknik material, tekanan air pori dan faktor keamanan minimum untuk setiap kondisi pembebanan.

Standar ini dipersiapkan oleh Komite Teknis 91-01 Bahan Konstruksi Bangunan dan Rekayasa Sipil pada Sub Komite Teknis 91-01-S1 Sumber Daya Air melalui Gugus Kerja Bidang Geoteknik, Bendungan dan Waduk (Balai Bangunan Hidraulik dan Geoteknik Keairan). Standar ini telah dibahas dalam rapat konsensus yang diselenggarakan pada tanggal 4 Desember 2013 di Bandung yang melibatkan para narasumber, pakar dan instansi terkait serta telah melalui jajak pendapat 28 Agustus 2014 sampai 27 Oktober 2014.

Beberapa gambar dalam lampiran standar ini menggunakan warna.



Pendahuluan

Desain suatu bendungan tipe urugan yang menahan air dalam volume yang besar, harus mempertimbangkan faktor keamanan terhadap pengaruh kestabilan lereng bendungan. Dari pengalaman di Amerika Serikat (USBR) dan di negara-negara lain di dunia kurang lebih 12% dari bendungan tipe urugan yang mengalami keruntuhan disebabkan karena pengaruh kestabilan lereng bendungan.

Sampai sekarang suatu standar mengenai metode analisis kestabilan lereng statik untuk bendungan tipe urugan belum ada di Indonesia. Karena itu, perlu dibuat standar yang dapat digunakan sebagai acuan bagi pendesain bendungan tipe urugan. Standar ini membahas tentang kondisi pembebanan dan kriteria faktor keamanan minimum, sifat fisik material, tekanan air pori, metode analisis stabilitas lereng statik dan pertimbangan analisis desain.



Metode analisis stabilitas lereng statik bendungan tipe urugan

1 Ruang lingkup

Standar ini membahas tentang analisis stabilitas lereng statik bendungan tipe urugan, dengan mempertimbangkan kondisi pembebanan, sifat teknik material, tekanan air pori dan faktor keamanan minimum untuk desain. Analisis stabilitas lereng bendungan tipe urugan harus dilaksanakan berdasarkan standar ini. Namun jika terjadi penyimpangan karena beberapa alasan, maka kriteria tidak menggunakan standar ini harus diberikan dalam suatu dokumentasi teknis tentang analisis stabilitas.

2 Acuan normatif

Dokumen referensi di bawah ini harus digunakan dan tidak dapat ditinggalkan untuk melaksanakan pedoman ini:

SNI 03-1962-1990, Penanggulangan longsor, Petunjuk perencanaan
 SNI 1964:2008, *Cara uji berat jenis tanah*
 SNI 1965:2008, *Cara uji penentuan kadar air untuk tanah dan batuan*
 SNI 1966:2008 *Cara uji penentuan batas plastis dan indeks plastisitas tanah*
 SNI 1967:2008, *Cara uji penentuan batas cair tanah*
 SNI 2455:2015, *Cara uji triaksial untuk tanah dalam keadaan terkonsolidasi tidak terdrainase (Consolidated Undrained/CU) dan terkonsolidasi terdrainase (Consolidated Drained/CD)*
 SNI 06-2487-1991, *Metode pengujian lapangan kekuatan geser baling*
 SNI 2813:2008, *Cara uji kuat geser langsung tanah terkonsolidasi dan terdrainase*
 SNI 03-2832-1992, *Metode pengujian untuk mendapatkan kepadatan tanah maksimum dengan kadar air optimum*
 SNI 3423:2008, *Cara uji analisis ukuran butir tanah*
 SNI 3638:2012, *Metode pengujian kuat tekan bebas tanah kohesif*
 SNI 4813:2015, *Cara uji triaksial untuk tanah kohesif dalam keadaan tidak terkonsolidasi dan tidak terdrainase (UU)*

3 Istilah dan definisi

Istilah dan definisi berikut berlaku untuk penggunaan standar ini:

3.1

muka air waduk maksimum

elevasi muka air yang diijinkan dan ditentukan terhadap tinggi jagaan minimal yang telah disepakati

3.2

muka air waduk minimum

elevasi muka air waduk yang merupakan puncak permukaan air pada kapasitas konservasi inaktif

3.3

muka air waduk normal

elevasi muka air waduk pada kondisi eksploitasi normal dan merupakan puncak permukaan air pada kapasitas konservasi aktif

4 Kondisi pembebanan dan faktor keamanan

4.1 Umum

Kondisi pembebanan yang diperhitungkan harus berdasarkan pada pengetahuan tentang program pembangunan, program operasi waduk, program pemeliharaan dan gawat darurat, serta perilaku material tubuh bendungan dan fondasi yang berhubungan dengan peningkatan tekanan air pori. Selain itu, juga disyaratkan faktor keamanan minimum untuk setiap kondisi pembebanan yang ditinjau.

4.2 Pemilihan kondisi pembebanan

Kondisi pembebanan yang dibahas seperti berikut ini:

4.2.1 Kondisi masa konstruksi

Stabilitas lereng statik bendungan harus dianalisis pada kondisi selesai konstruksi, atau bila diperlukan pada kondisi selesai sebagian pengurugan, yang tergantung pada jadwal konstruksi dan hubungan antara tekanan air pori dengan waktu.

4.2.2 Kondisi aliran langgeng

Stabilitas lereng udik dan hilir bendungan harus dianalisis pada elevasi muka air waduk normal di udik dan muka air minimum di hilir yang mengatur garis freatik dalam tubuh bendungan.

4.2.3 Kondisi operasional

Elevasi muka air waduk maksimum pada dasarnya lebih tinggi dari puncak permukaan air pada kapasitas konservasi aktif. Karena itu, stabilitas lereng hilir bendungan dianalisis pada kondisi muka air waduk maksimum. Lereng udik dianalisis pada kondisi penurunan muka air waduk secara cepat dari puncak permukaan air pada kapasitas konservasi aktif (M.A Normal) ke puncak permukaan air pada kapasitas inaktif (M.A Minimum), dan dari permukaan air maksimum ke puncak permukaan air pada kapasitas konservasi inaktif. Jika digunakan *berm* udik (*upstream berms*), maka lereng udik juga dianjurkan dianalisis pada kondisi penurunan muka air secara cepat dari puncak permukaan air pada kapasitas konservasi aktif ke elevasi antara (*intermediate*).

4.2.4 Kondisi darurat

Kondisi pembebanan lain juga harus dianalisis, jika terjadi hal-hal sebagai berikut:

- Pembuntuan pada sistem drainase internal atau pembuntuan sebagian
- Penurunan muka air pada kondisi penggunaan air yang berlebihan
- Penurunan muka air untuk pelepasan air darurat dari waduk (*emergency release*)

4.3 Pemilihan parameter untuk kondisi pembebanan

Petunjuk umum penentuan elevasi muka air waduk, sifat teknis material tanah, dan parameter tekanan air pori untuk analisis stabilitas pada berbagai kondisi pembebanan adalah sebagai berikut:

4.3.1 Kondisi masa konstruksi

Pada kondisi selesai dan selama konstruksi berlangsung, analisis dapat dilaksanakan baik dengan konsep tegangan efektif maupun dengan konsep tegangan total.

a) Metode kuat geser efektif

Material tubuh bendungan atau fondasi dapat menimbulkan peningkatan tekanan air pori berlebih pada waktu pembebanan (pengurugan) selama konstruksi pelaksanaan berlangsung. Metode tegangan efektif membutuhkan perhitungan perubahan tekanan air pori selama konstruksi yang merupakan fungsi dari waktu. Karena itu, tekanan air pori harus diamati selama konstruksi agar dapat diketahui apakah tidak melebihi batas yang telah ditentukan. Metode perhitungan tekanan air pori pada kondisi pembebanan selama konstruksi berlangsung dan selesai konstruksi adalah seperti berikut ini:

- 1) Mengadakan uji laboratorium pada contoh uji yang mewakili material tubuh bendungan dan fondasi untuk mengetahui tekanan udara pori dan tekanan air pori.
- 2) Mengadakan uji laboratorium pada setiap contoh uji material untuk memperkirakan perilaku tekanan air pori terhadap waktu dan pembebanan.
- 3) Menyusun jadwal konstruksi, menghitung tekanan air pori material sebagai fungsi waktu memeriksa stabilitas lereng udik dan hilir.
- 4) Jika diperlukan, melakukan penyusunan ulang jadwal berdasarkan pelaksanaan konstruksi yang aktual dan memeriksa ulang stabilitas.

b) Metode kuat geser total

Analisis dengan metode kuat geser total tidak memperhitungkan tekanan air pori dalam uji laboratorium yang mendekati kondisi di lapangan, dan dinyatakan sebagai kuat geser material. Uji kuat geser sebaiknya dilakukan pada contoh uji yang dikompaksi untuk mengantisipasi kadar air dan kepadatan yang sesuai dengan di lapangan. Kuat geser total yang digunakan dalam analisis harus berada dalam rentang tegangan normal yang sesuai dengan di lapangan.

4.3.2 Kondisi aliran langgeng

Rencana operasi waduk tahunan harus dievaluasi untuk memperkirakan elevasi muka air waduk yang digunakan dalam menentukan garis freatik pada kondisi aliran langgeng.

Elevasi muka air yang digunakan biasanya elevasi muka air normal, tetapi ada kemungkinan tercapai dalam tenggang waktu yang singkat.

4.3.3 Kondisi operasional

a) Elevasi muka air waduk maksimum

Garis freatik diperkirakan berada pada elevasi muka air waduk maksimum. Elevasi muka air waduk maksimum dapat juga terjadi pada kolam tambahan yang mengalir relatif cepat atau pada kolam pengendali banjir yang airnya tidak dikeluarkan untuk beberapa bulan. Sifat fisik material pada bagian atas bendungan dan bagian yang mengalami fluktuasi air waduk, harus dievaluasi. Tujuannya untuk memperkirakan apakah terjadi aliran langgeng atau aliran transien, agar perhitungan garis freatiknya dapat disesuaikan.

b) Kondisi surut cepat

Selama waduk terisi air pada elevasi muka air normal atau maksimum, maka bendungan berada dalam kondisi jenuh karena pengaruh rembesan air. Jika terjadi surut cepat, dimana muka air waduk turun lebih cepat daripada aliran air pori dari rongga-rongga butiran tanah, maka akan terjadi ketidak seimbangan tekanan air pori. Pada umumnya, analisis pada kondisi surut cepat didasarkan pada asumsi konservatif seperti berikut ini:

- 1) Disipasi tekanan air pori pada material kedap air tidak terjadi selama surut cepat;
- 2) Garis freatik dianggap identik dengan garis freatik pada kondisi aliran langgeng.

Untuk analisis stabilitas lereng bendungan, elevasi muka air waduk kritis pada waktu surut cepat tidak akan sama dengan elevasi muka air waduk minimum. Oleh karena itu, harus diperhitungkan elevasi muka air waduk antara muka air waduk normal sampai muka air waduk minimum.

4.3.4 Kondisi darurat

a) Pembuntuan pada sistim drainase internal

Jika desain sistem drainase internal diragukan dapat mengatur garis freatik pada bendungan, maka harus dilakukan pemeriksaan dengan menggunakan garis freatik dengan asumsi bahwa sistem drainase internal ini tidak seluruhnya berfungsi.

b) Surut cepat pada kondisi darurat

Rencana surut cepat pada muka air waduk dalam upaya pemeliharaan atau kondisi darurat harus ditinjau ulang. Tujuannya untuk menentukan parameter material yang tepat bagi analisis stabilitas, dan untuk memodifikasi asumsi garis freatik pada permukaan lereng udik. Surut cepat pada elevasi antara muka air waduk normal dan muka air waduk minimum tidak perlu diperhitungkan.

4.4 Kriteria faktor keamanan minimum

Nilai faktor keamanan minimum untuk setiap kondisi pembebanan menunjukkan kriteria dalam analisis stabilitas lereng. Deviasi untuk kriteria umum diperkenankan, jika ditunjang oleh alasan-alasan yang dapat dipertanggung jawabkan.

Nilai faktor keamanan ini harus diperhitungkan terhadap faktor-faktor:

- a) Kondisi desain selama analisis dan resiko keruntuhan.
- b) Tingkat ketelitian parameter kuat geser (*shear strength*) dan prediksi tekanan air pori.
- c) Struktur tubuh bendungan.
- d) Investigasi di lapangan.
- e) Kompatibilitas tegangan-regangan dari material fondasi dan tubuh bendungan.
- f) Kualitas pengawasan konstruksi.
- g) Tinggi bendungan.
- h) Penilaian berdasarkan pengalaman di masa lalu terhadap bendungan tipe urugan.

Faktor keamanan untuk analisis stabilitas lereng, didefinisikan sebagai rasio dari total tahanan geser tanah yang diperkenankan terhadap tegangan geser tanah. Keamanan disini diperlukan untuk mempertahankan keseimbangan sepanjang permukaan bidang yang berpotensi untuk longsor atau tergelincir.

Faktor keamanan minimum untuk desain stabilitas lereng ditentukan terutama berdasarkan pertimbangan faktor-faktor pengawasan terhadap tekanan air pori dan asumsi kuat geser material.

Kriteria faktor keamanan dipertimbangkan terhadap hal-hal seperti berikut ini.

- a) Berdasarkan analisis dari USBR dengan menggunakan cara keseimbangan batas.
- b) Bila cara analisis berbeda maka faktor keamanan berbeda, sekalipun untuk bendungan yang sama dengan sifat fisik material dan kondisi pembebanan yang sama.
- c) Untuk kondisi pembebanan pada waktu selesai konstruksi, tekanan air pori berlebih akan meningkat di dalam zona kedap air dari bendungan atau fondasi. Hal ini disebabkan karena tanah tidak dapat terkonsolidasi sepenuhnya selama masa konstruksi berlangsung. Oleh karena itu, penggunaan parameter kuat geser efektif sangat berpengaruh terhadap faktor keamanan.
 - (i) Faktor keamanan minimum sebesar 1,3 cukup memadai, jika tekanan air pori diawasi selama konstruksi berlangsung atau untuk analisis pada kondisi kuat geser total.
 - (ii) Jika digunakan kuat geser efektif tanpa pengawasan tekanan air pori di lapangan, maka faktor keamanan minimum diambil 1,4 untuk mengurangi pengaruh tekanan air pori berlebih.
- d) Untuk kondisi aliran langgeng pada elevasi muka air waduk normal, harus diperhitungkan faktor keamanan minimum sebesar 1,5. Hal ini untuk mengantisipasi pengaruh ketidakpastian kuat geser material, tekanan air pori di dalam material kedap air, dan pembebanan jangka panjang, serta keruntuhan lereng hilir dan pelepasan air darurat;
- e) Untuk kondisi surut cepat, pembebanan mengalami ketidakseimbangan, sehingga lereng udik tidak stabil walaupun pembebanan ini berlangsung singkat. Namun, keruntuhan pada lereng udik tidak menimbulkan pelepasan air waduk. Karena itu faktor keamanan minimum dapat diambil sebesar 1,3 atau lebih rendah sesuai dengan kondisi pembebanan.

Ikhtisar faktor keamanan minimum yang disyaratkan untuk analisis stabilitas lereng bendungan tipe urugan, ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1 - Persyaratan faktor keamanan minimum untuk stabilitas bendungan tipe urugan

No	Kondisi	Kuat Geser	Tekanan Air Pori	FK Tanpa Gempa	FK dengan Gempa *
1.	Selesai konstruksi tergantung : 1. Jadwal konstruksi. 2. Hubungan antara tekanan air pori dan waktu. Lereng U/S dan D/S. Dengan gempa tanpa kerusakan digunakan 50 % koefisien gempa desain.	1. Efektif	Peningkatan tekanan air pori pada urugan dan fondasi dihitung menggunakan data lab. dan pengawasan instrumen.	1,30	1,20
			Idem hanya tanpa pengawasan instrumen.	1,40	1,20
			Hanya pada urugan tanpa data lab. dan dengan/tanpa pengawasan instrumen.	1,30	1,20
		2. Total	Tanpa pengawasan instrumen.	1,30	1,20
2.	Aliran langgeng tergantung: 1. Elevasi muka air normal sebelah udik. 2. Elevasi muka air sebelah hilir. Lereng U/S dan D/S. Dengan gempa tanpa kerusakan digunakan 100 % koef. gempa desain.	1. Efektif	Dari analisis rembesan	1,50	1,20
3.	Pengoperasian waduk tergantung : 1. Elevasi muka air maksimum di udik 2. Elevasi muka air minimum di udik (<i>dead storage</i>). Lereng U/S harus dianalisis untuk kondisi surut cepat	1. Efektif	Surut cepat dari El. muka air normal sampai El. muka air minimum. Lereng U/S dan D/S.	1,30	1,10
			Surut cepat dari El. MA maksimum sampai El. MA minimum. Pengaruh gempa diambil 0 % dari koefisien gempa desain.	1,30	-
4.	Kondisi darurat tergantung: 1. Pembuntuan pada sistem drainase 2. Surut cepat karena penggunaan air melebihi kebutuhan. 3. Surut cepat keperluan darurat.	1. Efektif	Surut cepat dari El. MA maksimum sampai EL. terendah bangunan pengeluaran. Pengaruh gempa diabaikan.	1,20	-
* Catatan: Periksa standar tentang metode analisis stabilitas lereng dinamik bendungan tipe urugan.					

5 Kuat geser material

5.1 Kriteria faktor keamanan minimum

Analisis stabilitas lereng bendungan dan lereng alami membutuhkan perhitungan kuat geser material sepanjang permukaan yang berpotensi runtuh. Berdasarkan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb dengan konsep tegangan efektif, maka kuat geser "S" (pada saat runtuh) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$S' = c' + (\sigma - u) \tan \phi' \quad (1)$$

Keterangan:

- c' adalah kohesi efektif (t/m^2);
- ϕ' adalah sudut geser dalam efektif (derajat);
- u adalah tekanan air pori pada bidang runtuh selama pembebanan, pada saat runtuh (t/m^2);
- σ adalah tegangan normal total pada bidang runtuh selama pembebanan pada saat runtuh (t/m^2);
- S' adalah kuat geser efektif (t/m^2);

Berdasarkan konsep kuat geser total, kuat geser S_u dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$S_u = f(\sigma_c') \quad (2)$$

Keterangan:

- S_u adalah kuat geser tanpa drainase (t/m^2)
- σ_c' adalah tekanan konsolidasi efektif (t/m^2)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa kuat geser tanpadrainase sebagai fungsi dari σ_c' , yaitu tekanan konsolidasi efektif sebelum terjadi keruntuhan geser. Dalam analisis stabilitas lereng, tekanan konsolidasi efektif adalah tegangan efektif normal yang terjadi pada permukaan yang berpotensi runtuh, sebelum mengalami keruntuhan.

5.2 Sumber dan data kuat geser

Kuat geser material dapat diperoleh dari uji lapangan dan uji laboratorium, atau diperkirakan berdasarkan pengalaman yang tergantung pada tahapan analisis pada waktu desain.

5.2.1 Parameter bahan urugan diperkirakan dari pengalaman

Kuat geser untuk desain pada masa persiapan, diperkirakan berdasarkan data geologi lokal dan hasil uji laboratorium untuk material yang sama, serta pengalaman.

Bahan urugan bendungan dianjurkan dapat diperoleh dari lokasi rencana bendungan. Hampir semua bahan urugan dapat digunakan, kecuali tanah yang mengandung zat organik atau zat yang mudah larut. Pada umumnya bahan urugan bendungan dibedakan dalam 3 jenis yaitu batu, pasir kerikilan dan tanah lempungan (kedap air).

Konstruksi bendungan disesuaikan dengan karakteristik bahan yang terpilih, kondisi lapangan (topografi, geologi dan meteorologi), dan pola pelaksanaan, serta peralatan yang digunakan agar biaya konstruksi dapat seefisien mungkin. Ketiga jenis bahan urugan yang sering digunakan diuraikan seperti berikut ini:

a) Tanah lempungan

Tanah lempungan adalah bahan utama bendungan tipe urugan, karena selalu digunakan baik bendungan tanah homogen maupun untuk bendungan zonal. Dari

klasifikasi “*Unified Soil Classification System*” (USCS) (lihat Tabel 2) dapat diperkirakan sifat teknis bahan, berupa koefisien permeabilitas (k), kepadatan kering maksimum (MDD), kadar air optimum (OMC), dan kuat geser efektif (ϕ' dan c'). Dengan demikian kualitas bahan inti kedap air atau bahan zone lulus air atau filter dapat ditentukan dengan mudah. Selain Tabel 2, parameter teknis bahan urugan tanah di Indonesia dari hasil penelitian NAJOAN (1992) dapat diperiksa pada tabel 3 dan tabel 4. Dengan mengetahui nilai batas plastis w_p dan kadar air pemadatan w_f dari uji laboratorium, maka nilai OMC, MDD, γ_f dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan dalam tabel 3. Dan kuat geser ϕ , c , ϕ' , c' dapat diperoleh dari persamaan dalam tabel 4. dengan pemadatan dilakukan pada daerah basah dari OMC ($w_f > \text{OMC}$). Sebagai contoh, bahan yang digunakan mempunyai batas plastis $w_p = 34\%$, kadar air pemadatan $w_f = 35\%$ dan termasuk klasifikasi tanah CH, maka dari persamaan-persamaan dalam tabel 3. diperoleh $\text{OMC} = 31.54\%$, $\text{MDD} = 1.36 \text{ t/m}^3$ dan $\gamma_f = 1.31 \text{ t/m}^3$. Dari tabel 4, diperoleh kuat geser $\phi = 10.37^\circ$, $c = 0.45 \text{ kg/cm}^2$, $\phi' = 26.1^\circ$, $c' = 0.08 \text{ kg/cm}^2$. Bila dibandingkan dari Tabel 2. dengan nilai $\text{OMC} = 25 \pm 1.2 \%$, $\text{MDD} = 1.51 \pm 0.03 \text{ t/m}^3$, $\phi' = 19^\circ \pm 5^\circ$ dan $c' = +1.15 \pm 0.57 \text{ t/m}^2$ relatif mendekati.

(MDD = kepadatan kering maksimum; OMC = kadar air maksimum).

b) Pasir dan kerikil

Selain sebagai bahan urugan bendungan, pasir dan kerikil juga merupakan bahan utama untuk lapisan filter dan lapisan transisi suatu bendungan. Parameter kepadatan dan kuat gesernya disesuaikan dengan klasifikasi tanah (periksa Tabel 2).



Tabel 2 - Karakteristik tanah sebagai bahan timbunan dan fondasi bendungan

Klas. USCS	Tipe tanah	Kualitas sebagai bahan urugan	Koef. Perm k (cm/s)	Data Pemadatan Standar (USBR).			
				MDD t/m ³	OMC %	ϕ' (°)	c' t/m ²
GW	Kerikil gradasi baik, campuran kerikil-pasiran	Kuat geser tinggi, dapat digunakan untuk zone lulus air dangkal dari bendungan	$>10^{-2}$	>1.91	<13.3	>38	*
GP	Kerikil gradasi buruk, campuran kerikil pasiran	Sama dengan yang diatas	$>10^{-2}$	>1.76	<12.4	>37	*
GM	Kerikil lanauan, kerikil pasiran lanauan gradasi buruk	Kuat geser tinggi, kurang baik untuk zone lulus air, baik untuk inti kedap air.	$10^{-3}-10^{-6}$	>1.83	<14.5	>34	*
GC	Kerikil lempungan, kerikil pasiran lempungan gradasi buruk	Kuat geser tinggi, dapat digunakan untuk inti kedap air	$10^{-6}-10^{-8}$	>1.84	<14.7	>31	*
SW	Pasir gradasi baik, campuran pasir kerikil	Kuat geser baik, dapat digunakan untuk zone lulus air permukaan perlu dilindungi	10^{-3}	1.91 ± 0.08	13.3 ± 2.5	38 ± 1	*
SP	Pasir gradasi buruk, campuran pasir kerikil	Kuat geser baik, dapat digunakan untuk tubuh bendungan dengan lereng sedang.	10^{-3}	1.76 ± 0.03	12.4 ± 1.0	37 ± 1	*
SM	Pasir lanauan, pasir lanauan gradasi buruk	Kuat geser sedang, dapat digunakan untuk zona kedap air	$10^{-3}-10^{-6}$	1.83 ± 0.02	14.5 ± 0.4	34 ± 1	2.01 ± 0.67
SM-SC	Pasir lanauan lempungan plastisitas rendah	Sama dengan SM	$10^{-3}-10^{-6}$	1.91 ± 0.02	12.8 ± 0.5	33 ± 3	1.44 ± 0.57
SC	Pasir lempungan, campuran pasir lempungan gradasi buruk	Kuat geser sedang, dapat digunakan untuk inti kedap air untuk pengendalian banjir	$10^{-6}-10^{-8}$	1.84 ± 0.02	14.7 ± 0.4	31 ± 3	1.15 ± 0.57
ML	Lanau anorganik dan lanau lempungan	Kuat geser rendah, dapat digunakan untuk tanggul dengan sedikit pengaturan	$10^{-3}-10^{-6}$	1.65 ± 0.02	19.2 ± 0.7	32 ± 2	$0.86 \pm$ *
ML-CL	Campuran lanau anorganik dan lempung	Sama dengan ML dan CL	$10^{-3}-10^{-6}$	1.75 ± 0.03	16.8 ± 0.7	32 ± 2	$2.20 \pm$ *
CL	Lempung anorganik dengan plastisitas rendah sampai medium	Kuat geser rendah dapat dipergunakan untuk inti atau lapisan kedap air	$10^{-6}-10^{-8}$	1.73 ± 0.02	17.3 ± 3.0	28 ± 2	1.34 ± 0.19
OL	Lanau organik dan lanau lempungan dengan plastisitas rendah	Tidak baik untuk tanggul	$10^{-4}-10^{-6}$	*	*	*	*
MH	Lanau lempungan anorganik, lanau elastis	Kuat geser sedang sampai rendah, dapat digunakan untuk inti bendungan	$10^{-4}-10^{-6}$	1.31 ± 0.06	36.3 ± 3.2	25 ± 3	2.01 ± 0.86
CH	Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi	Kuat geser sedang sampai rendah, dapat digunakan untuk inti tipis lapisan selimut dan tubuh bendungan	$10^{-6}-10^{-8}$	1.51 ± 0.03	25.5 ± 1.2	19 ± 5	1.15 ± 0.57
OH	Lempung dan lempung lanauan organik	Tidak baik untuk tanggul	$10^{-6}-10^{-8}$	*	*	*	*
Pt	Tanah mengandung gambut & organik	Tidak mungkin untuk konstruksi	*	*	*	*	*

USBR, 1987

Tabel 3 - Parameter pemadatan tanah lempung di Indonesia (NAJOAN 1990)

Klasifikasi (USCS)	OMC=a w _p +b	MDD= aOMC ^b	γ _f = a w _f ^b
CH	OMC=0.65 w _p +9.44	MDD= 5.8 OMC ^{-0.42}	γ _f = 6.28 w _f ^{-0.44}
CL	OMC=0.84 w _p +2.64	MDD=4.94 OMC ^{-0.37}	γ _f =5.11 w _f ^{-0.37}
SC	OMC=0.85 w _p +2.66	MDD= 3.96 OMC ^{-0.29}	γ _f = 4.12 w _f ^{-0.31}
MH	OMC=0.65 w _p +1.77	MDD= 5.72 OMC ^{-0.42}	γ _f = 6.47 w _f ^{-0.45}
CH+MH	OMC=0.67 w _p +9.15	MDD= 5.68 OMC ^{-0.41}	γ _f = 4.59 w _f ^{-0.34}
CH+MH+ CL+SC	OMC=0.70 w _p +7.25	MDD= 5.54 OMC ^{-0.41}	γ _f = 6.28 w _f ^{-0.45}

CATATAN OMC = kadar air maksimum (%) MDD = kepadatan kering maks (t/m³)
w_p = batas plastis (%) w_f = kadar air lapangan diatas OMC (%)
γ_f = kepadatan kering lapangan (t/m³)

Tabel 4 - Kuat geser bahan urugan lempung di Indonesia (NAJOAN 1990)

Jenis tanah (USCS)	Kuat Hasil	Geser uji UU	total triaxial	Kuat Hasil CU	Geser uji Back	Efektif Triaxial Press.	Keterangan
	$q = a p + b$	ϕ (°)	c (kg/cm ²)	$q' = a p' + b$	ϕ' (°)	c' (kg/cm ²)	
CH	$q = 0.19p + 0.67$	10.95	0.68	$q' = 0.48p' + 0.07$	28.69	0.08	OMC
CH	$q = 0.18p + 0.45$	10.37	0.46	$q' = 0.41p' + 0.12$	24.20	0.13	OMC+1/ + 7%
CH	-	-	-	$q' = 0.44p' + 0.08$	26.10	0.09	>OMC
MH	$q = 0.19p + 0.67$	13.88	0.75	$q' = 0.45p' + 0.28$	26.74	0.31	OMC
MH	-	-	-	$q' = 0.51p' + 0.12$	30.66	0.14	OMC+2/5%
MH	-	-	-	$q' = 0.48p' + 0.19$	28.69	0.22	>OMC

CATATAN : $q; q' = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 ; (\sigma_1' - \sigma_3')/2$ $\phi = \arcsin (a)$
 $p; p' = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 ; (\sigma_1' + \sigma_3')/2$ $c = b/\cos(\phi)$
 $\sigma_1; \sigma_1' =$ tegangan utama maksimum total ; efektif (kg/cm²)
 $\sigma_3; \sigma_3' =$ tegangan utama minimum total; efektif (kg/cm²)
 $\phi; \phi' =$ sudut geser total ; efektif (°)
 $c; c' =$ kohesi total ; efektif (kg/cm²)

c) Batu

Batu digunakan sebagai bahan urugan batu, sebagai zona lulus air atau semi lulus air pada bendungan zonal, dan untuk hamparan pelindung (rip rap) pada lereng udik atau urugan drainase tumit di kaki hilir bendungan tanah. Parameter kepadatannya bervariasi antara 2.1 t/m³ sampai 2.3 t/m³ dan kuat gesernya dapat ditentukan dari persamaan sebagai berikut :

$$\phi = 45.75 - 6.77 \log (\sigma_n/0.03) \quad (4)$$

$$\phi = 50.72 - 6.89 \log (\sigma_n/0.03) \quad (5)$$

$$\phi = 55.68 - 6.91 \log (\sigma_n/0.03) \quad (6)$$

Keterangan:

ϕ adalah sudut geser dalam (derajat) ;

σ_n adalah tegangan normal (kg/cm^2);

Persamaan (4) berlaku untuk urugan batu dengan kepadatan rendah, gradasi jelek (*poorly graded*) dan butiran lunak (kuat tekan rendah)

Persamaan (6) berlaku untuk urugan batu dengan kepadatan tinggi, gradasi baik dan butiran kuat (kuat tekan tinggi).

Persamaan (5) berlaku untuk urugan batu dengan kekuatan geser berada antara nilai rata-rata dari persamaan (4) dan (6).

Walaupun demikian, uji laboratorium harus dilakukan untuk desain final.

5.2.2 Uji geser lapangan

Uji kuat geser di lapangan dapat dilakukan pada material fondasi dan tubuh bendungan dengan uji geser baling sesuai dengan SNI 06-2487-1991. Tujuannya adalah untuk mengukur langsung kuat geser tanpadrainase dari tanah lempung lunak yang jenuh air.

5.2.3 Uji geser laboratorium

Uji kuat geser di laboratorium dilakukan baik pada contoh tanah takterganggu maupun yang terganggu dari material fondasi dan tubuh bendungan. Pengujian ini dilakukan untuk memperoleh parameter kuat geser yang diperlukan dalam analisis stabilitas bendungan. Yang termasuk uji kuat geser di laboratorium adalah uji tekan bebas (SNI 03-3638-1994), uji geser triaxial (SNI 2455 dan SNI 4813), uji geser langsung (SNI 2813), uji geser torsi atau rotasi, dan uji geser sederhana (*simple shear*).

Penentuan parameter kuat geser merupakan bagian terpenting dan tersulit dari analisis stabilitas. Kesulitan itu antara lain dalam memperoleh contoh uji yang dapat mewakili, menjaga contoh uji agar tetap takterganggu, sesuai kondisi pembebanan di lapangan, dan menghindari kesalahan pengujian. Pada umumnya contoh uji yang benar-benar mewakili kondisi di lapangan sangat sulit diperoleh. Namun parameter kuat geser dapat ditentukan berdasarkan nilai rata-rata dari sejumlah hasil pengujian. Pembebanan dan tegangan yang bekerja pada contoh uji di laboratorium, berbeda dengan yang ada pada elemen tanah di lokasi bidang runtuh. Oleh karena itu, pengalaman mempunyai peranan penting dalam evaluasi hasil pengujian, yaitu untuk memastikan apakah parameter yang dipilih dapat mewakili material di lapangan.

5.3 Hubungan antara kuat geser dengan kondisi pembebanan

Pembebanan yang biasanya dievaluasi untuk analisis stabilitas lereng, adalah pada kondisi:

- selesai dan selama kondisi berlangsung;
- aliran langgeng;
- surut cepat.

Parameter kuat geser material yang digunakan di dalam analisis harus memberikan gambaran tentang perilaku material pada tiap kondisi pembebanan.

5.3.1 Kuat geser pada kondisi selesai dan selama konstruksi berlangsung

Pembebanan pada kondisi selesai dan selama konstruksi berlangsung dapat dianalisis dengan menggunakan konsep kuat geser total dan konsep kuat geser efektif.

a) Kuat geser total

1) Fondasi

Parameter kuat geser tanah lempungan fondasi yang jenuh air dapat diperoleh dengan uji tekan bebas UC (*UC=Unconfined compression test*) atau uji triaxial UU (*UU=Unconsolidated undrained test*) tanpa pengukuran tekanan air pori pada contoh uji tak terganggu. Contoh tanah tak terganggu harus dipilih dan diuji berdasarkan rentang kedalaman dari material fondasi. Jika digunakan uji geser baling di lapangan, maka juga harus diuji berdasarkan rentang kedalaman. Sedangkan untuk tanah fondasi lainnya digunakan uji triaxial UU.

2) Material urugan

Contoh uji yang mewakili material urugan harus diuji kompaksi standar (SNI 03-2832-1992) terlebih dahulu, sehingga diperoleh kurva hubungan antara kadar air (w) dan kepadatan kering (γ_{dr}). Untuk pengujian laboratorium disiapkan benda uji dengan menumbuk material dalam tabung cetak. Benda uji yang diperoleh dapat mempunyai berat volume kering (γ_{dr-lap}) dan kadar air (w_{lap}) sesuai dengan kondisi lapangan yang dikehendaki. Kemudian benda uji ini diuji triaxial UU (tanpa drainase dan tanpa konsolidasi), dengan tekanan keliling sesuai dengan rentang tegangan normal di lapangan. Pada umumnya, sudut geser dalam $\phi \approx 0$ dan kohesi $c \neq 0$ diperoleh untuk tanah lempung yang jenuh. Sedangkan untuk tanah lempung jenuh sebagian, selubung keruntuhan Mohr (*Mohr envelope*) berbentuk kurva pada rentang tegangan normal rendah. Sudut geser dalam dan kohesi ditentukan pada rentang tegangan yang sesuai dengan kondisi lapangan.

b) Kuat geser efektif

Apabila tekanan air pori didalam tubuh bendungan dan fondasi meningkat karena adanya proses pengurangan beban, maka harus digunakan kuat geser efektif dalam analisis stabilitas lereng. Uji triaxial terkonsolidasi tanpadrainase (*CU = Consolidated Undrained test*) dengan pengukuran tekanan air pori harus dilakukan pada contoh tanah lempung dan lanau karena permeabilitasnya rendah. Tujuannya agar contoh tanah dapat diasumsi mengalami keruntuhan pada kondisi tanpadrainase. Uji triaxial terkonsolidasi dengan drainase (*CD = Consolidated Drained test*) atau uji geser langsung (CD) dapat digunakan untuk material fondasi dan tubuh bendungan. Baik untuk material berbutir kasar maupun untuk material kedap air dan kedap sebagian pada pembebanan jangka panjang dengan kecepatan pembebanan sama atau lebih rendah dari kecepatan konsolidasi. Dalam hal ini, tekanan air pori berlebih dijaga tetap nol. Kuat geser material fondasi lempung overkonsolidasi (*overconsolidated clay*) dan serpih lempungan (*clay-shale*) dapat diperoleh dari uji triaxial CD atau CU.

5.3.2 Kuat geser pada kondisi aliran langgeng

Stabilitas lereng bendungan pada kondisi aliran langgeng harus dianalisis dengan menggunakan parameter kuat geser efektif dari material tubuh dan fondasi bendungan. Uji triaxial CU atau CD harus dilakukan dengan pengukuran tekanan air pori. Pemberian tekanan balik (*backpressure*) yang cukup untuk mencapai derajat kejenuhan 95%, harus dilakukan baik untuk benda uji material terkompaksi maupun material fondasi tak terganggu. Uji geser langsung digunakan untuk pasir, lempung berpasir atau lempung kelanauan. Uji ini juga dapat digunakan untuk lempung plastisitas rendah sampai tinggi; namun pelaksanaannya membutuhkan kecepatan geser lambat, sehingga menjadi kurang praktis. Stabilitas lereng udik umumnya tidak bersifat kritis pada kondisi pembebanan ini, sehingga hanya lereng bagian hilir yang harus dianalisis.

5.3.3 Kuat geser pada kondisi surut cepat

Stabilitas lereng bendungan pada kondisi surut cepat harus dianalisis dengan menggunakan parameter kuat geser efektif dari material tubuh dan fondasi bendungan. Uji triaxial CU dengan penjenjuran sebelumnya dan pengukuran tekanan air pori harus dilakukan untuk tanah, baik yang kedap air maupun kedap air sebagian. Uji triaxial (CD) atau uji geser langsung (CD) dapat digunakan untuk material dengan permeabilitas yang tinggi ($> 10^{-4}$ cm/s).

Faktor-faktor yang harus diperhitungkan untuk pengujian tanah lempung overkonsolidasi atau serpih lempungan, antara lain keadaan geologi sekitar bendungan, keberadaan bidang perlapisan, dan daerah yang pernah mengalami longsor. Pengujian yang harus dilakukan untuk material ini adalah uji triaxial CU dengan pengukuran tekanan air pori, uji triaxial CD, atau uji geser langsung (CD). Pada daerah yang permukaannya berpotensi runtuh dan ada tanda-tanda bidang longsor, maka harus dilakukan analisis stabilitas menggunakan parameter kuat geser sisa (residual) dengan uji geser langsung (CD).

6 Perhitungan tekanan air pori

Tekanan air pori dapat dihitung dengan beberapa metode di bawah ini.

6.1 Metode garis freatik

Perhitungan tekanan air pori untuk kondisi aliran langgeng dapat diperkirakan sebagai tekanan hidrostatik di bawah garis freatik. Permukaan garis freatik diperoleh berdasarkan prosedur yang dikembangkan oleh *Casagrande*, *Pavlovsky*, *Cedergren*, dan yang lainnya (periksa RSNI M-02-2002, Metode analisis dan cara pengendalian rembesan air untuk bendungan tipe urugan). Pada umumnya, metode ini agak konservatif untuk bendungan tipe zonal, dan tidak dapat digunakan untuk kasus-kasus khusus. Sebagai contoh, pengaruh anisotropi, pengaruh infiltrasi air hujan dan tekanan artesis dalam fondasi, sehingga perlu digunakan metode lain.

Metode garis freatik juga dapat digunakan untuk menghitung tekanan air pori pada kondisi surut cepat, dengan memodifikasi garis freatik pada kondisi aliran langgeng dengan asumsi kondisi aman sebagai berikut ini.

- Selama terjadi surut cepat, tidak terjadi disipasi tekanan air pori pada material kedap air, sehingga garis freatik tidak mengalami perubahan.
- Elevasi muka air normal atau elevasi muka air maksimum diturunkan secara cepat sampai elevasi muka air minimum.

Namun, metode garis freatik tidak dapat digunakan untuk menghitung tekanan air pori pada kondisi selesai dan selama konstruksi berlangsung.

6.2 Metode grafis menggunakan jaring alir dan model analog

Analisis dengan metode jaring alir pada kondisi aliran langgeng dapat digunakan untuk memperkirakan tekanan pori, penyebaran tekanan pori dan garis freatik pada tubuh dan fondasi bendungan. Pengaruh sifat anisotropi terhadap permeabilitas dapat diperhitungkan, walaupun kurang teliti.

Metode analog listrik juga dapat digunakan untuk menghitung tekanan air pori secara akurat dalam media isotropik dan anisotropik pada kondisi aliran langgeng.

6.3 Metode numerik

Metode numerik adalah cara analisis yang terbaik untuk menentukan penyebaran tekanan pori di dalam tubuh dan fondasi bendungan yang kompleks, baik pada kondisi aliran langgeng maupun surut cepat. Metode ini biasanya dikerjakan secara numerik dengan menggunakan cara elemen hingga, beda hingga dan elemen batas. Permeabilitas material tubuh dan fondasi bendungan harus diketahui secara teliti, untuk menghitung tekanan pori secara akurat. Jika diperlukan, metode numerik dapat digunakan pada desain akhir. Semua penjelasan mengenai metode analisis rembesan air dapat diperiksa secara rinci pada standar analisis rembesan air

6.4 Metode pengukuran lapangan dengan instrumen pisometer

Peningkatan tekanan air pori selama konstruksi berlangsung di dalam tubuh dan fondasi bendungan, tergantung pada sifat fisik material dan kecepatan pengurugan. Hasil pengamatan tekanan air pori dengan pisometer sistem tertutup selama konstruksi berlangsung, harus dibandingkan dengan perkiraan tekanan air pori dari hasil analisis desain. Jika diperlukan, untuk memperkuat analisis stabilitas bendungan pada kondisi selama konstruksi berlangsung, maka sebaiknya dilakukan pengawasan terhadap pergerakan dan tekanan air pori di dalam bagian kritis tubuh dan fondasi bendungan. Tekanan air pori yang terukur dari pisometer dengan baik dapat langsung digunakan untuk analisis stabilitas lereng bendungan atau lereng alami, pada kondisi aliran langgeng atau surut cepat.

6.5 Metode *Hilf*

Prosedur rinci untuk memperkirakan kurva tegangan total dengan tekanan air pori dari hasil uji konsolidasi di laboratorium dapat dilakukan dengan metode *J.W Hilf*. Prosedur ini dapat digunakan untuk menghitung tekanan air pori selama masa konstruksi berlangsung.

7 Analisis stabilitas lereng

7.1 Metode analisis

Metode analisis stabilitas lereng bendungan tipe urugan dapat dilakukan dengan dua cara berikut ini :

7.1.1 Cara keseimbangan batas (*limit equilibrium method*)

Metode analisis dengan cara keseimbangan batas adalah cara analisis yang paling praktis dalam desain bendungan. Beberapa cara yang sering digunakan dapat diperiksa pada Tabel 5. Hasil analisis biasanya dinyatakan dalam faktor keamanan FK, yang dinyatakan sebagai berikut:

$$FK = \frac{\text{Kuat geser (shear strength)}}{\text{Tegang geser (shear stress)}}$$

$$\text{dengan: } FK = \frac{S}{\tau} \geq 1 \text{ aman}$$

atau $S > \tau$, aman
 $S < \tau$, tidak stabil

Tabel 5 - Analisis stabilitas dengan cara keseimbangan batas

Metode	Program	Karakteristik
Bishop termodifikasi (1955)	Mstabl, Mstab, Slope-w, Stabl-g, Sb-slope, Stablgm	Hanya bidang runtuh lingkaran, memenuhi keseimbangan momen, tidak memenuhi keseimbangan gaya-gaya horisontal dan vertikal
<i>Force Equilibrium</i> (Lowe dan Karafiat, 1960 dan US Corps Of Engineers 1970)	Utxas2, Utxas3, Slope-w	Segala bentuk bidang runtuh, tidak memenuhi keseimbangan momen, memenuhi keseimbangan gaya-gaya horisontal dan vertikal
Janbu's Generalized Procedure (Janbu, 1968)	Stabl-g,	Segala bentuk bidang runtuh, memenuhi segala kondisi keseimbangan, lokasi gaya samping dapat divariasi.
Morgenstern and Price's, (1965)	Slope-w	Segala bentuk bidang runtuh, memenuhi segala kondisi keseimbangan, lokasi gaya samping dapat divariasi
Spencer's (1967)	Mstab, Slope-w, Sb-slope, Sstab2	Segala bentuk bidang runtuh, memenuhi segala kondisi keseimbangan, lokasi gaya samping dapat divariasi

7.1.2 Cara elemen hingga

Cara elemen hingga yang memenuhi keseimbangan statis dalam setiap elemen juga dapat digunakan dalam analisis stabilitas bendungan. Hasil analisis dengan cara elemen hingga, dapat berupa perubahan tegangan dan regangan untuk berbagai sifat elastisitas material, heterogenitas massa tanah dan bentuk geometri. Program yang digunakan untuk analisis dengan cara elemen hingga dapat diperiksa pada Tabel 6.

7.2 Bentuk bidang gelincir

Bidang gelincir untuk analisis stabilitas lereng dapat berbentuk lingkaran atau bukan lingkaran dengan penjelasan sebagai berikut :

- Bidang gelincir berbentuk lingkaran (*circular arc*), lebih sering digunakan untuk analisis stabilitas lereng bendungan urugan homogen atau zonal, dengan fondasi dari material berbutir halus.
- Bidang gelincir bukan lingkaran, yang digambarkan dengan segmen-segmen linier, pada umumnya digunakan untuk analisis stabilitas lereng bendungan zonal dengan fondasi yang mengandung satu atau beberapa perlapisan lemah horisontal atau mendekati horisontal.

Tabel 6 - Program elemen hingga yang dapat digunakan untuk analisis

No.	Program	Kemampuan	Keterangan
1	Plaxis 7.2.	Menghitung tegangan dan regangan baik waktu konstruksi berlangsung maupun waktu terjadi aliran langgeng; untuk menilai apakah lereng dalam keadaan stabil dapat dilihat dari nilai $\tau/\tau_{\max} < 1$ (stabil).	
2	Sigma-w	Menghitung tegangan dan regangan baik waktu konstruksi berlangsung maupun waktu terjadi aliran langgeng; untuk menilai apakah lereng dalam keadaan stabil dapat dilihat dari nilai $\tau/\tau_{\max} < 1$ (stabil).	Perhitungan FK dapat dilakukan dengan Slope-w dengan menggunakan tegangan geser yang diperoleh dari Sigma-w

7.3 Bidang gelincir kritis

Bidang gelincir kritis harus ditentukan berada pada material yang relatif lemah dan pada zona dengan tekanan air pori yang tinggi. Pendesain harus mengevaluasi stabilitas dari massa gelincir secara keseluruhan dan menentukan lokasi permukaan gelincir dengan faktor keamanan minimum. Pada umumnya, bidang gelincir yang harus dianalisis adalah sebagai berikut:

- Melalui material urugan saja atau melalui urugan dan fondasi tetapi tidak harus melalui puncak bendungan.
- Seperti disebutkan pada butir a), tetapi termasuk puncak bendungan.
- Melalui zona utama dari urugan dan fondasi.
- Hanya bagian luar dari lereng udik atau hilir. Dalam kasus ini, analisis lereng infinit (*Infinite slope*) dapat digunakan untuk material nonkohesif.

7.4 Keruntuhan progresif

Beberapa kondisi umum yang dapat menimbulkan keruntuhan progresif dan cara penyelesaiannya dijelaskan seperti berikut ini:

- Distribusi tegangan yang tidak seragam pada bidang berpotensi runtuh, akan menyebabkan regangan yang relatif besar di beberapa lokasi. Kuat geser puncak terlampaui juga dapat berkembang dari satu tempat ke tempat lainnya. Akibatnya tahanan geser total menjadi lebih rendah, jika kuat geser puncak bergerak secara simultan sepanjang permukaan runtuh. Bila tegangan geser menurun secara signifikan setelah tegangan geser puncak tercapai (perilaku tegangan-regangan bersifat "*strain softening*"), maka kemungkinan akan terjadi keruntuhan progresif. Karena itu, penggunaan kuat geser puncak dalam analisis stabilitas menjadi tidak konservatif. Untuk meningkatkan faktor keamanan, dapat digunakan kuat geser puncak atau yang lebih rendah, agar diperoleh faktor keamanan tipikal. Pada tanah tertentu atau material batuan serpih dapat digunakan kuat geser sisa.
- Material fondasi yang bersifat kaku, sensitif, plastisitas tinggi, atau lempung overkonsolidasi atau serpih lempungan, mempunyai karakteristik tegangan-regangan sangat berbeda dengan material urugan. Karena itu, bendungan yang dibangun di atas fondasi seperti ini, harus dipertimbangkan terhadap hal-hal sebagai berikut :
 - Meningkatkan faktor keamanan melebihi batas minimum yang telah ditentukan.

- 2) Menggunakan kuat geser material urugan pada regangan yang dapat dibandingkan dengan material fondasi.
- 3) Menggunakan kuat geser sisa untuk tanah fondasi.
- c) Keruntuhan progresif mulai terjadi disepanjang retakan tarik (*tension crack*) yang disebabkan oleh penurunan diferensial memanjang atau melintang, selama konstruksi berlangsung atau penyusutan akibat pengeringan. Kedalaman maksimum retakan, yang menggambarkan lereng infinit, dapat dihitung dari persamaan:

$$h_t = (2c/\gamma) \tan (45+\phi /2) \leq \alpha H \quad (8)$$

Keterangan:

- c adalah kohesi (ton/m^2)
 γ adalah berat volume tanah (ton/m^3)
 ϕ adalah sudut geser dalam (derajat)
H adalah tinggi bendungan (m)
 α adalah konstanta =0,5

Kuat geser sepanjang retak susut dapat diabaikan, namun kemungkinan retakan terisi penuh air harus diperhitungkan untuk semua analisis stabilitas bendungan.

7.5 Efek tiga dimensi

Efek tiga dimensi harus diperhitungkan dalam analisis stabilitas lereng udik dan hilir pada daerah bidang kontak antara abutmen dan tubuh bendungan. Untuk daerah fondasi analisis harus memperhitungkan redistribusi tegangan dalam arah memanjang bendungan dan stabilitas lereng. Untuk itu analisis harus dilakukan dengan cara elemen hingga, untuk memperoleh tegangan dan regangan dan lain-lain, terutama untuk kondisi yang kompleks.

7.6 Verifikasi hasil analisis

Seorang pendesain harus yakin dan dapat membuktikan sesuai dengan pengetahuan dan pengalamannya, bahwa analisis stabilitas yang dilakukannya benar. Oleh karena itu, pendesain minimal harus mempelajari program yang digunakan agar mengerti tentang asumsi, teori, metodologi, dan kelemahan mendasar dari program tersebut. Selain itu juga mempunyai pengetahuan yang baik tentang mekanika tanah, untuk menentukan parameter kuat geser dan sifat fisik lainnya yang digunakan sebagai masukan dalam program. Pendesain harus dua kali pemeriksaan terhadap semua data masukan (kuat geser, berat volume, tekanan air pori, dan geometri), dan mengevaluasi keluaran dari program (berupa tegangan, gaya, dan berat). Tujuannya adalah untuk menentukan apakah hasilnya dapat dipertanggung-jawabkan, dan tidak hanya sekedar menerima keabsahan faktor keamanan dari program.

Walaupun metode analisis stabilitas lereng melalui program komputer cukup banyak, tetapi tujuan dari pembuktian analisis adalah untuk menjamin ketelitian dan kebenaran hasil analisis.

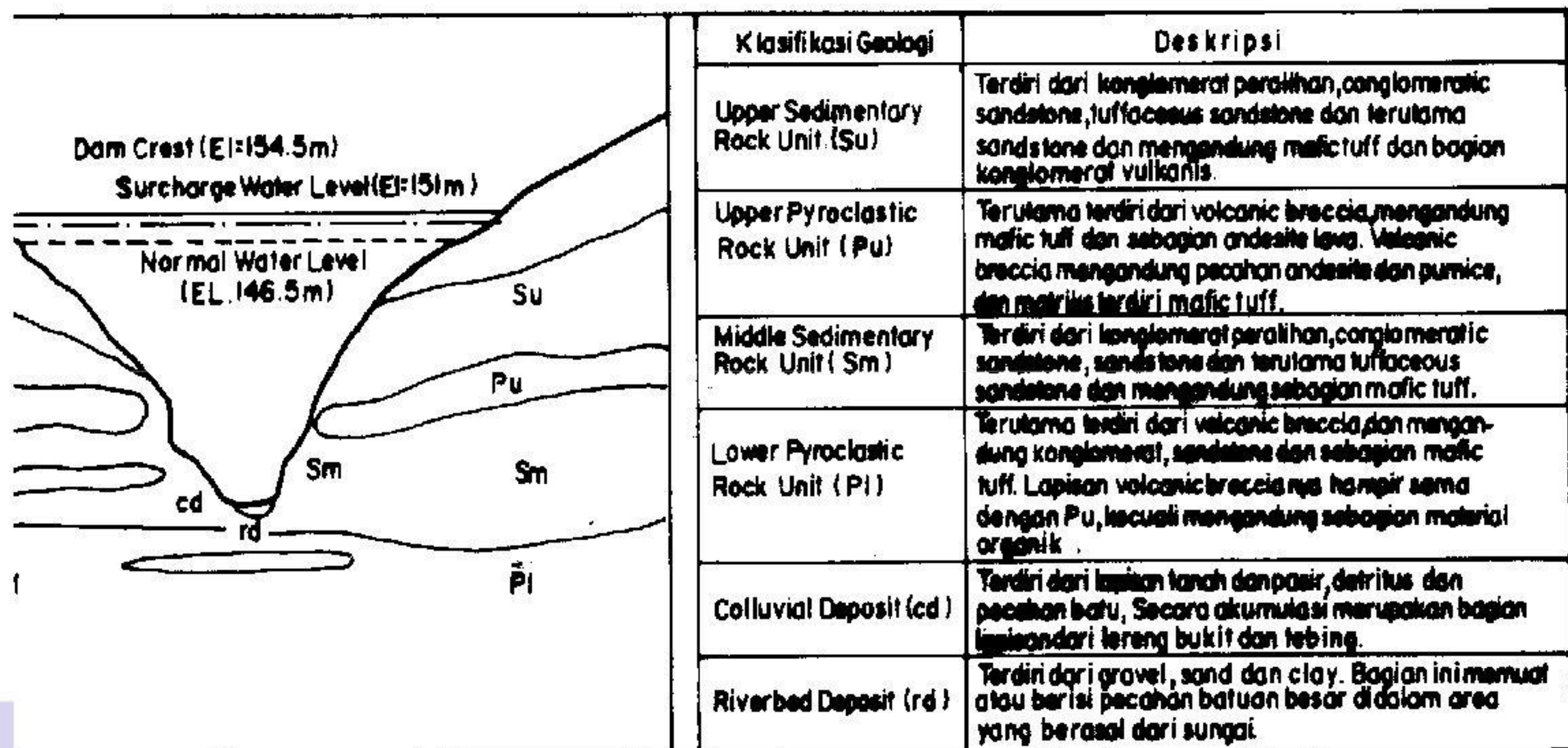
Lampiran A
(informatif)

Penentuan parameter bahan timbunan untuk analisis stabilitas lereng

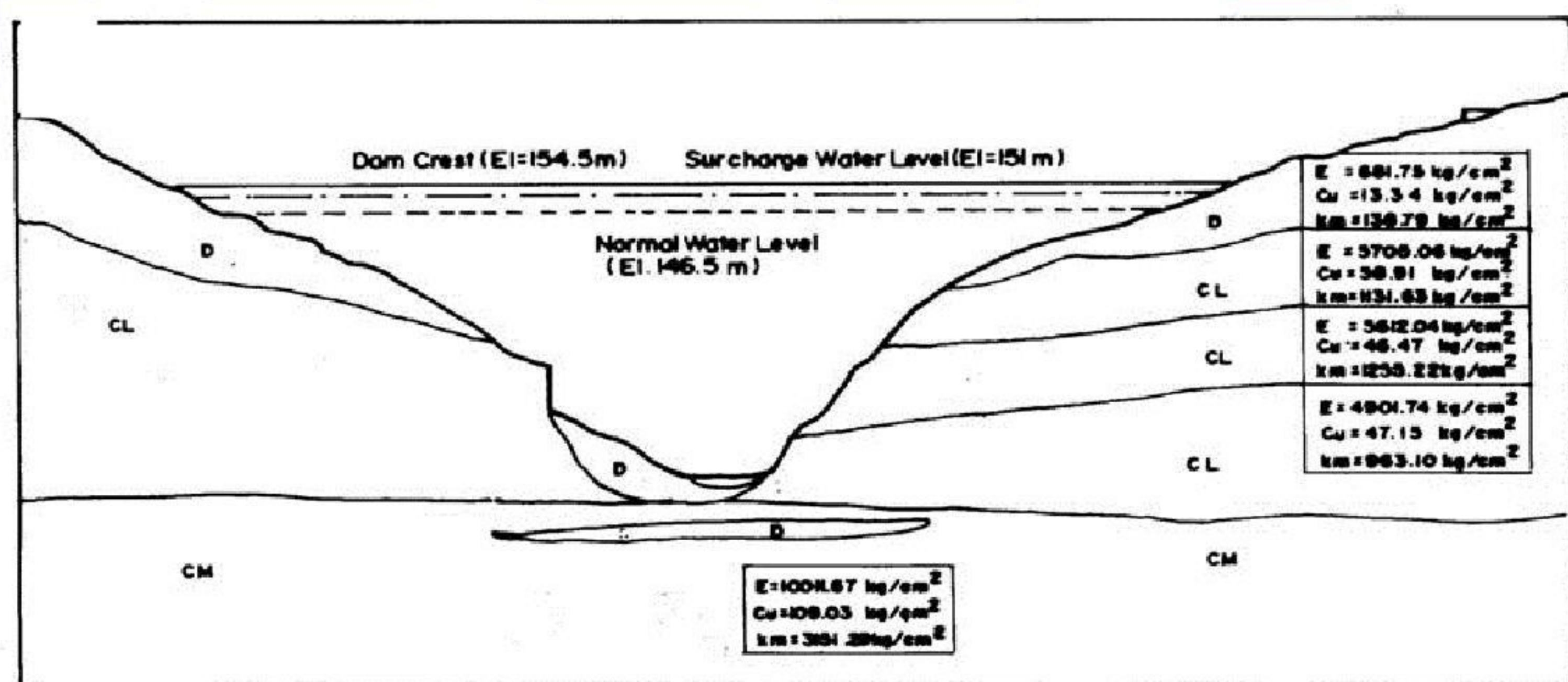
Tabel A.1 - Ikhtisar pengujian bahan urugan tanah untuk penentuan parameter desain untuk analisis stabilitas

No	Material	Jenis uji	Standar	Parameter	Kegunaan
1	Timbunan tanah	Sifat fisik :			
		Kadar air asli	SNI 1965:2008	w_n (%)	Menghitung γ_{dr} $\gamma_n = \gamma_{dr} (1 + w_n/100)$
		Berat jenis	SNI 1964:2008	Gs atau $\gamma_s = \gamma_w \times G_s$	Menghitung e, n dan γ_{sat} $e = \gamma_{dr} / \gamma_s$ $n/100 = 1 - \gamma_{dr} / \gamma_s$ $\gamma_{sat} = \gamma_{dr} + \gamma_w (n/100)$
		Berat volume (tak terganggu) Gradasi	SNI 03-3637-1994 ASTM D 2217 SNI 03-3423-1994	γ_n % butir < no.200 % butir < 2 μ D ₁₀ , D ₁₅ , D ₃₀ , D ₅₀ , D ₈₅	Menghitung γ_{dr} Klasifikasi dan dapat digunakan untuk menghitung koef. permeabilitas , desain bahan saringan dan menghitung $U_c = D_{60} / D_{10}$ (Koef. uniformiti) $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ (Koef. kurvatur)
		Batas cair Batas plastis	SNI 03-1967-1990 SNI 03-1966-1990	w_l (%) w_p (%)	Klasifikasi , korelasi Klasifikasi dan korelasi, menghitung $I_p = w_l - w_p$ (indeks plastisitas) $LI = (w_n - w_p) / I_p$ (Indeks likuiditas) $I_c = (w_l - w_n) / I_p$ (indeks konsistensi) $A = I_p / (\% < 2\mu)$ (rasio aktivitas)
		Batas susut	SNI 03-3422-1994	w_s (%)	Untuk menghitung pengembangan
		Karakteristik Mekanis. Pemadatan standar	SNI 03-1742-1989	Hubungan w dan γ_{dr} diperoleh OMC dan MDD	Menentukan γ_{dr-lap} dan w_{lap} dengan $D \geq 90-100$ % dan $OMC - 2 \leq w_{lap} \leq OMC + 3\%$ $D = \gamma_{dr-lap} / MDD = 0.95$ $\gamma_{dr-lap} = 0.95 MDD$ $w_{lap} = OMC + 3\%$ $\gamma_{lap} = \gamma_{dr-lap} (1 + w_{lap} / 100)$ $n / 100 = 1 - \gamma_{dr-lap} / \gamma_s$ $\gamma_{sat} = \gamma_{dr-lap} + \gamma_w (n/100)$
		Uji triaxial standar UU, CU	SNI 03-4813-1998 SNI 03-2455-1991	Pengujian dilakukan pada w_{lap} dan γ_{lap} hasil perhitungan pada hasil pemadatan standar Hasil berupa ϕ_u , C_u , ϕ'_{cu} , C'_{cu}	Analisis stabilitas dan dapat dihitung modulus elastisitas yaitu hubungan antara E_{50} dengan σ_3 .Dapat digunakan untuk analisis dengan cara elemen hingga.
		Uji permeabilitas standar	SNI 03-2435-1991	Pengujian dilakukan pada w_{lap} dan γ_{lap} hasil berupa nilai K (koefisien permeabilitas)	Analisis rembesan air

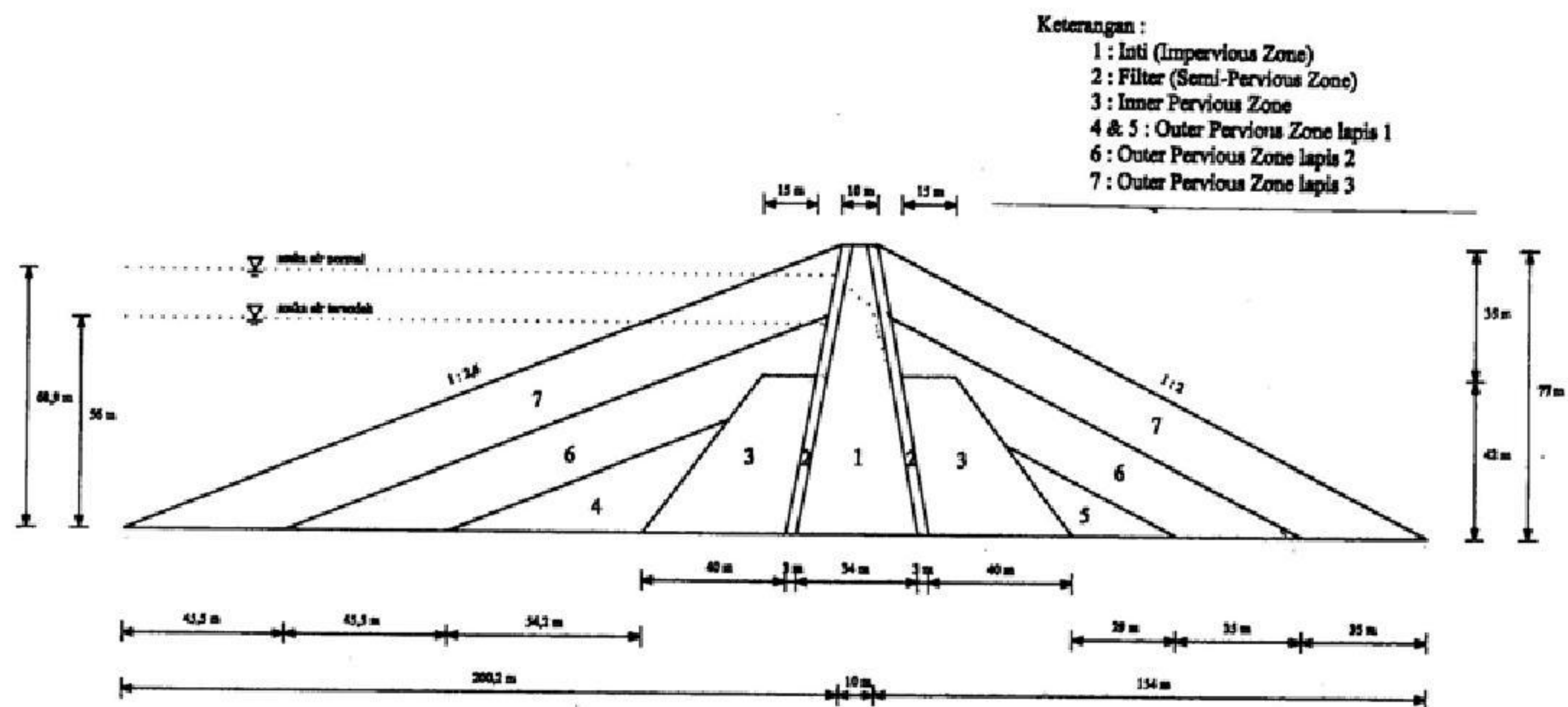
Lampiran B
(informatif)
Contoh analisis stabilitas bendungan Jatibarang



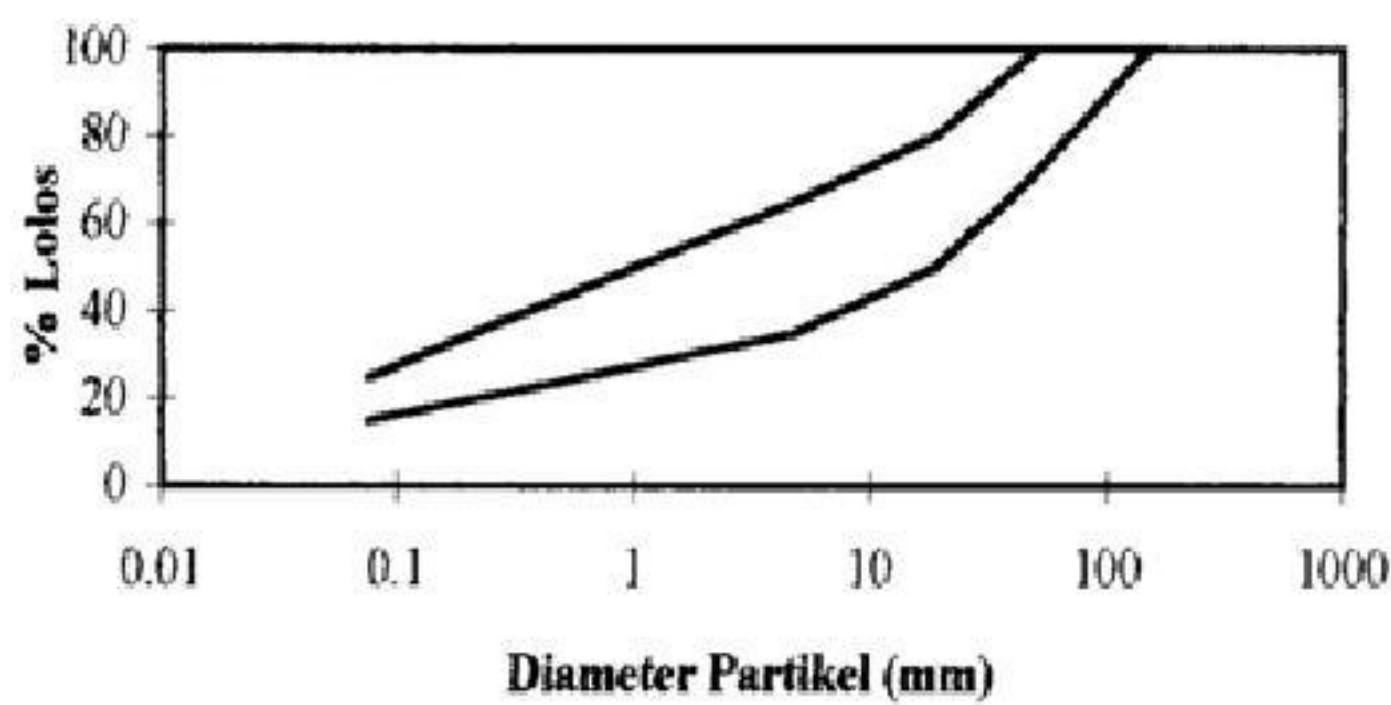
Gambar B.1 - Penampang geologi fondasi bendungan



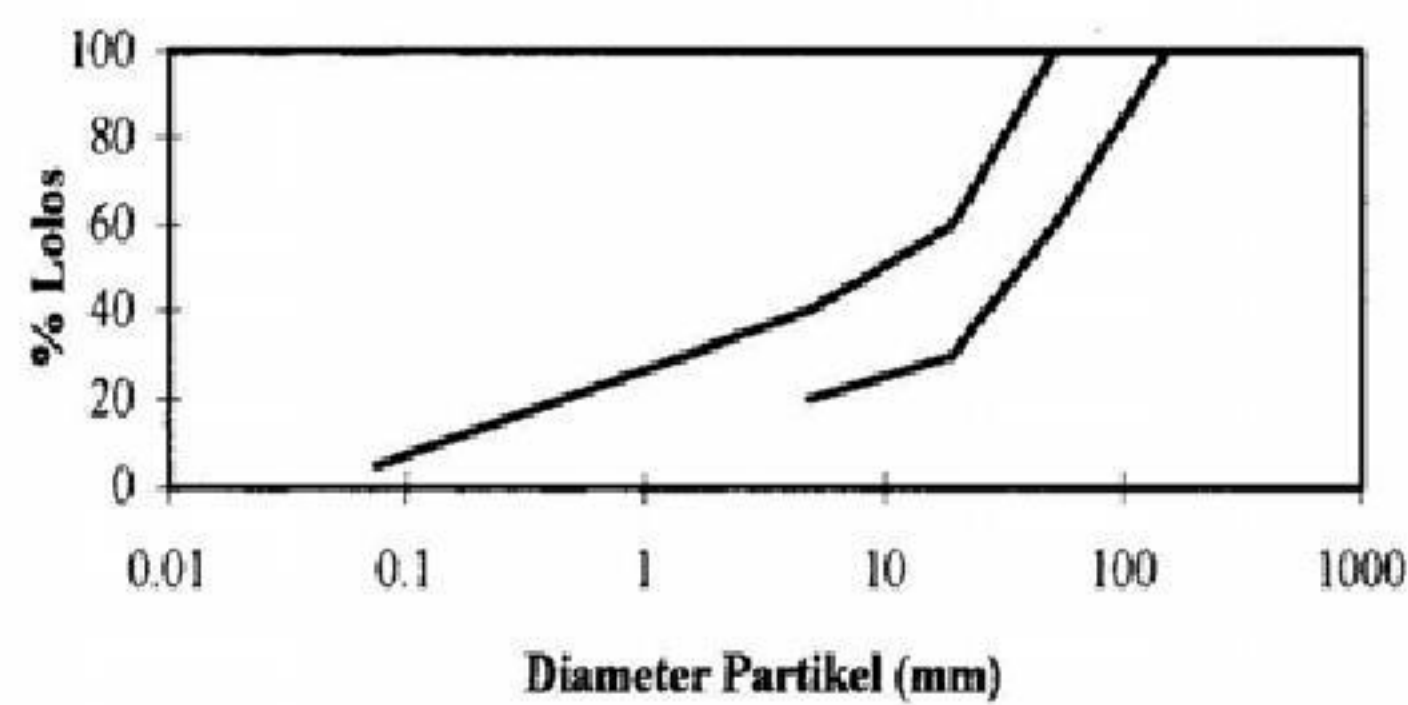
Gambar B.2 - Stratifikasi fondasi berdasarkan parameter hasil uji lapangan



Gambar B.3 - Profil bendungan Jatibarang, Jawa Tengah dengan asumsi fondasi kuat



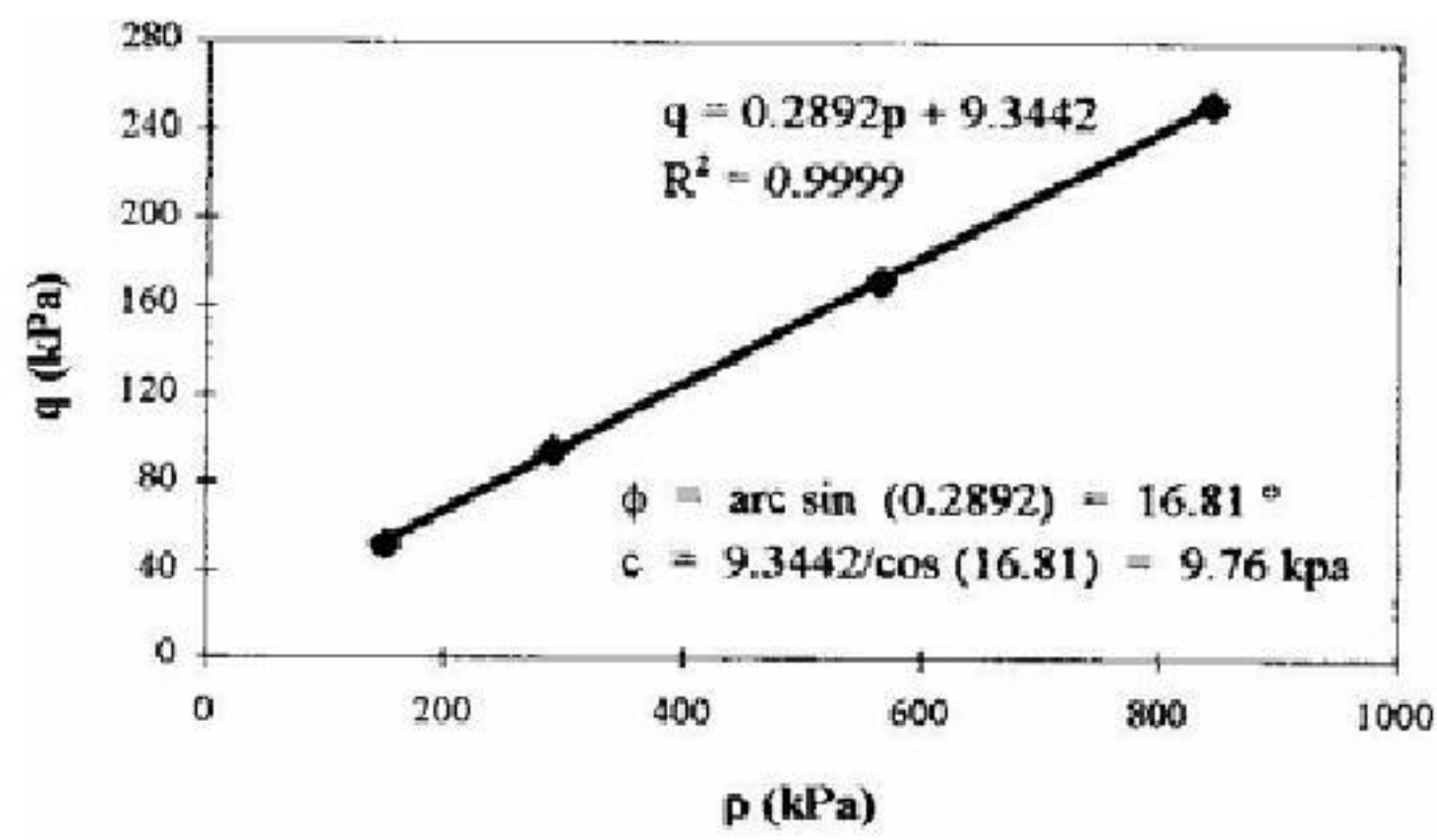
Gambar B.4 - Gradasi zona inti kedap air (1)



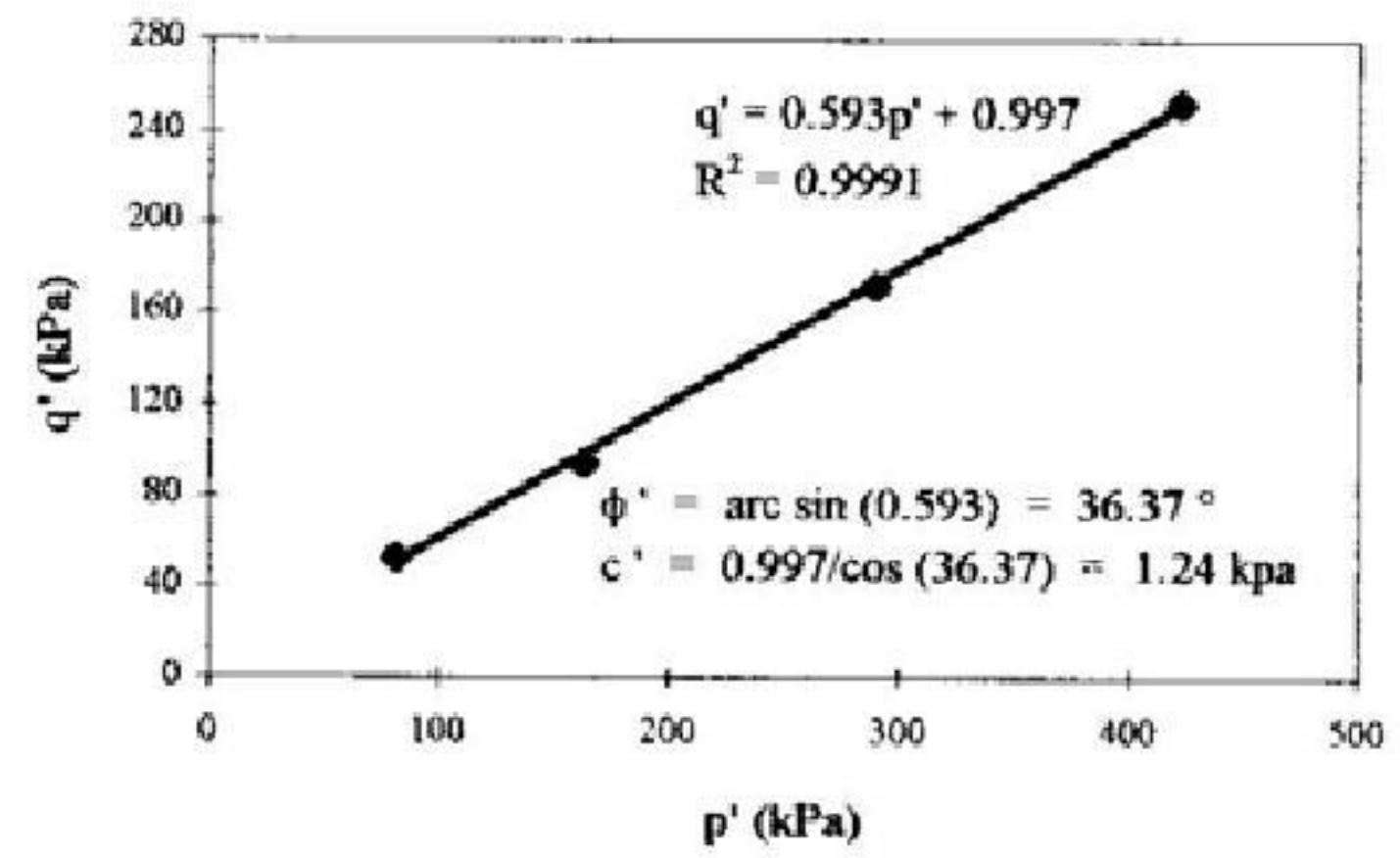
Gambar B.5 - Gradasi zona semi kedap air (2)

Tabel B.1 - Gradasi zona urugan batu

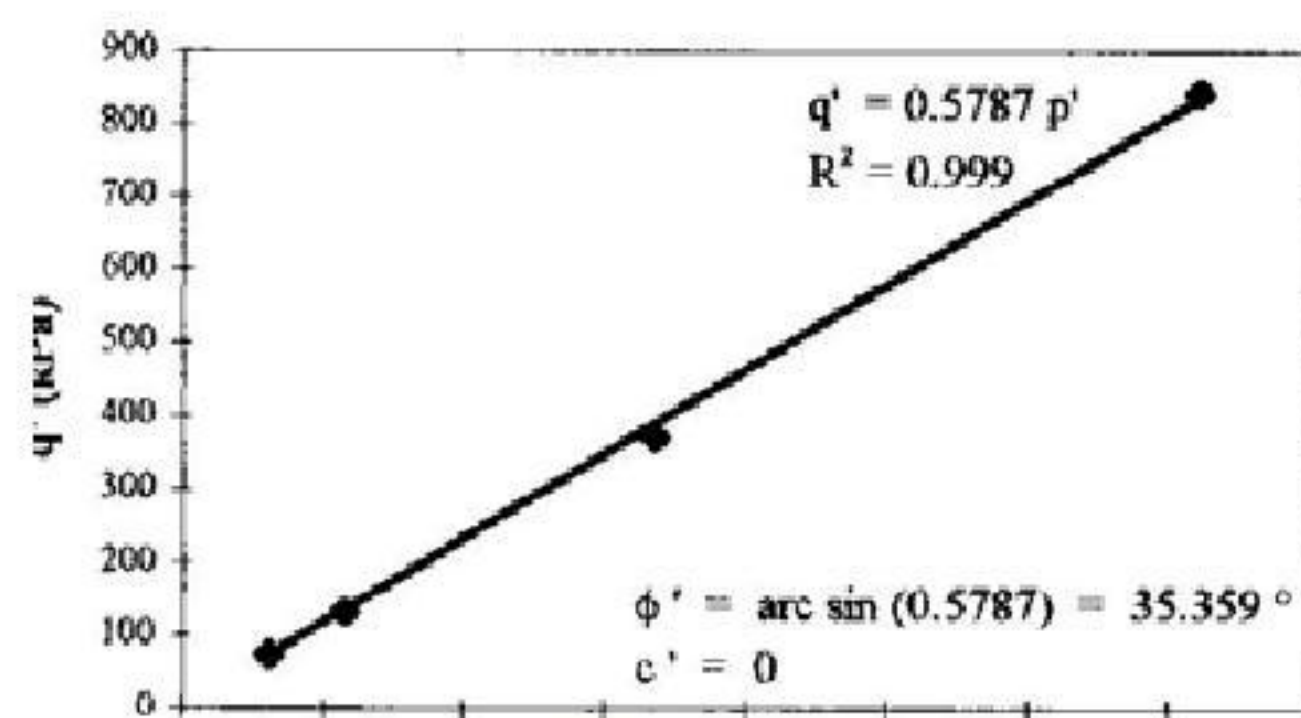
Gradasi (mm)	Material lulus air bagian dalam (3) (% lewat)	Material lulus air bagian luar (4,5,6) (% lewat)
750	100	100
100	≤ 70	≤ 60
4.75	≤ 20	≤ 10
0.075	≤ 5	≤ 5



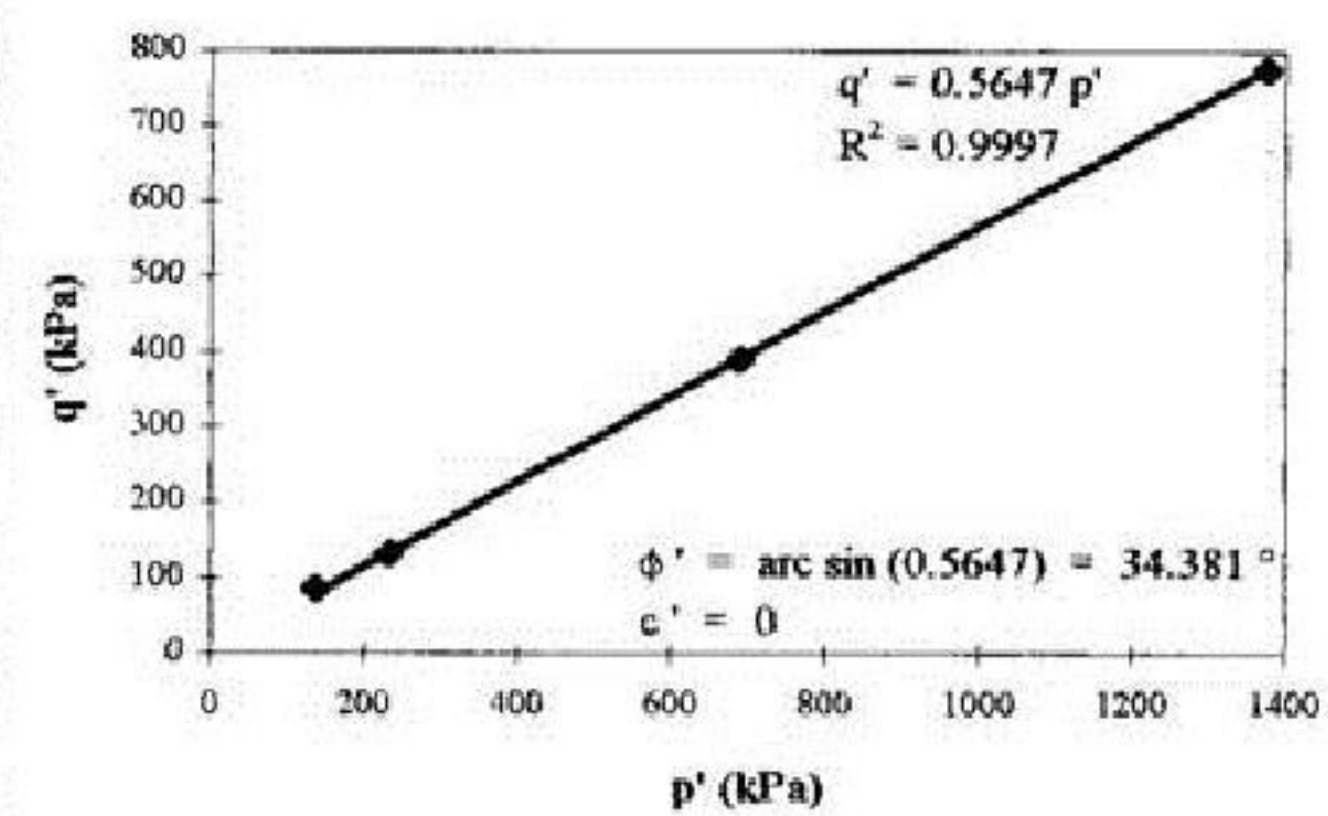
Gambar B.6 - Grafik p – q
bahan ukuran 1



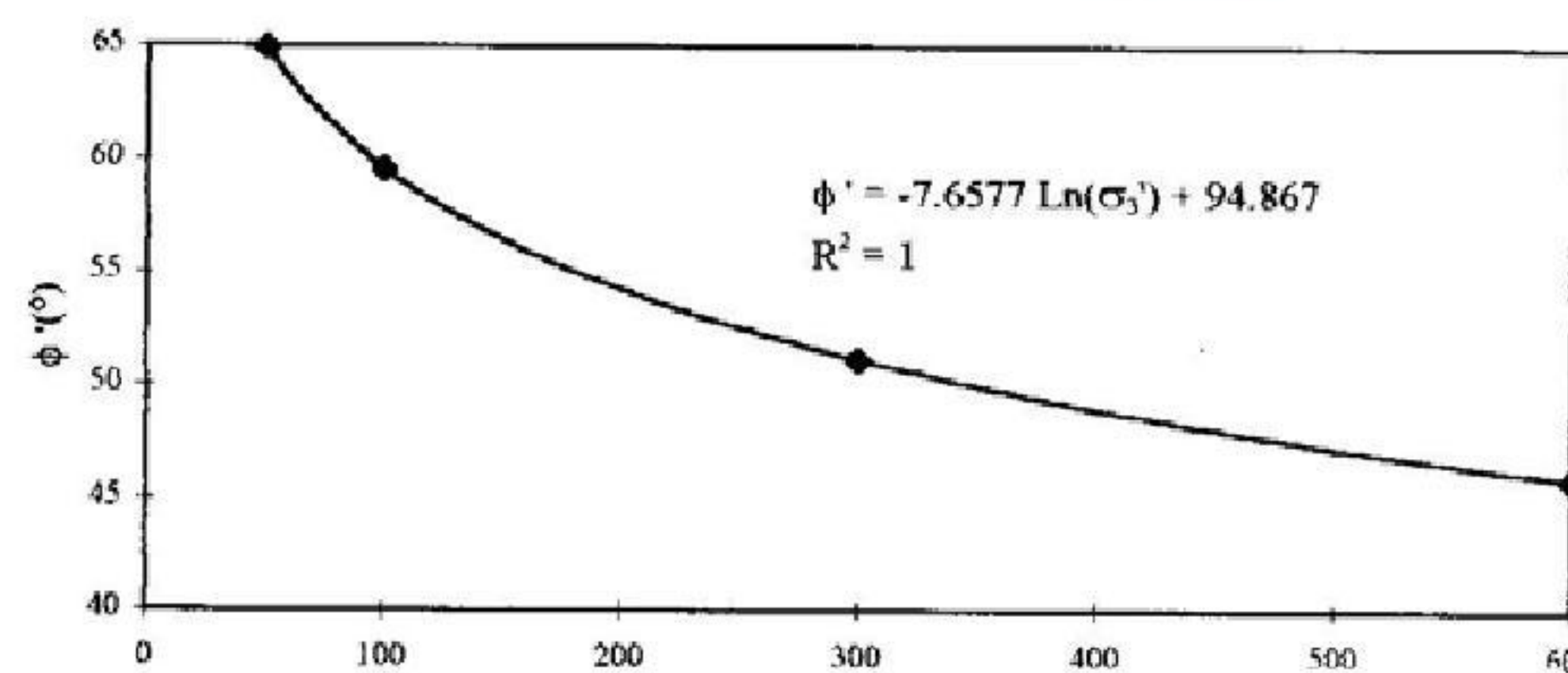
Gambar B.7 - Grafik p' – q
bahan ukuran 1



Gambar B.8 - Grafik p – q
bahan ukuran filter 2



Gambar B.9 - Grafik p' – q
bahan ukuran filter 2



Gambar B.10 - Grafik hubungan σ_3' dengan ϕ'

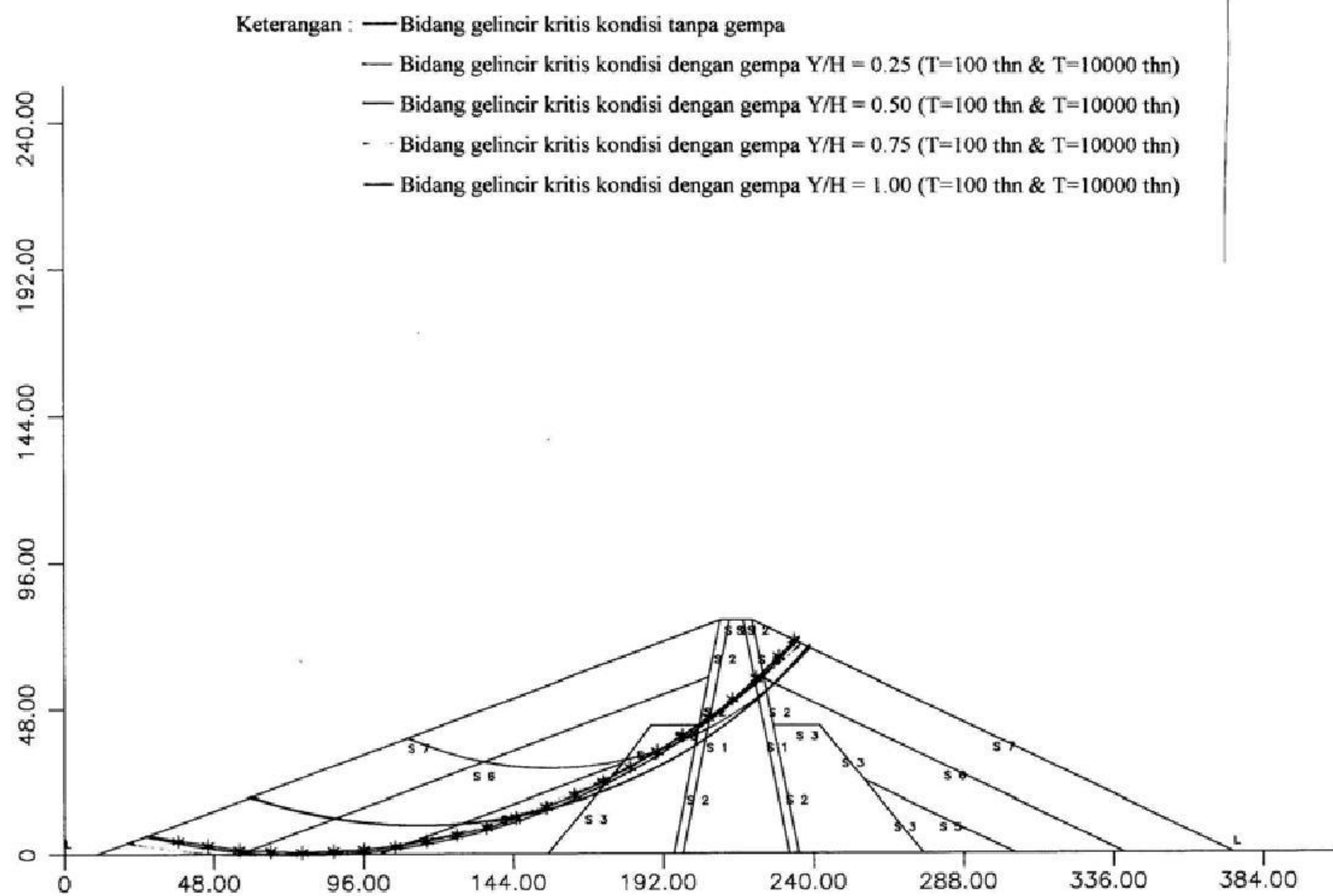
untuk material ukuran batu.

Tabel B.2 - Parameter yang digunakan untuk analisis stabilitas lereng

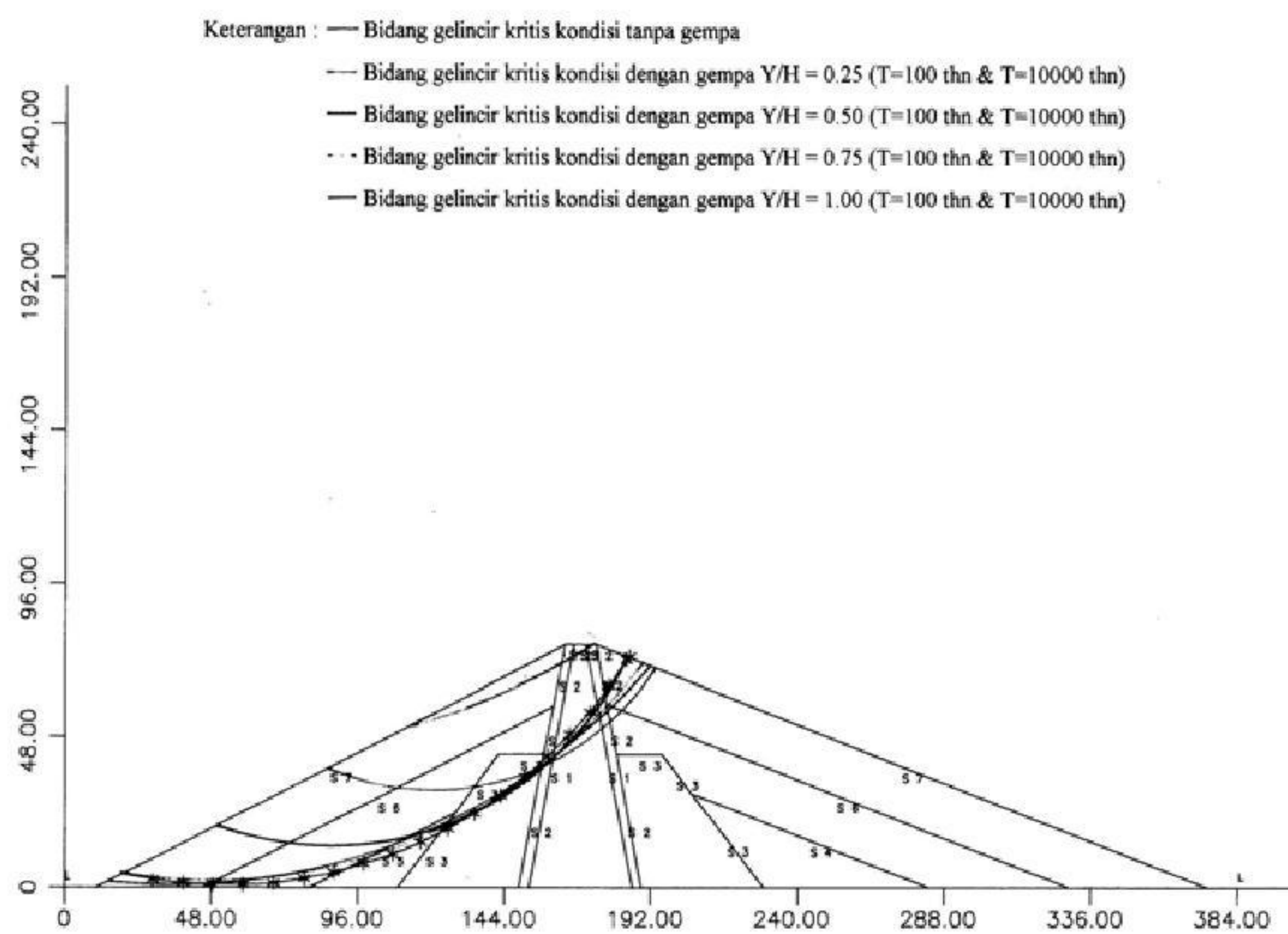
Kondisi	Zona Bendungan	γ (kN/m^3)	γ_{sat} (kN/m^3)	c atau c' (kPa)	ϕ atau ϕ' ($^\circ$)
Selesai konstruksi	Inti material 1	19,20	20,60	9,76	16,81
	Filter material 2	18,30	21,00	0,00	34,40
	Material lulus air bagian dalam 3	18,72	21,10	0,00	35,36
	Material lulus air bagian luar 4 dan 5	18,98	21,40	0,00	47,70
	Material lulus air bagian luar 6	18,98	21,40	0,00	51,20
	Material lulus air bagian luar 7	18,98	21,40	0,00	59,60
Kondisi aliran langgeng dan kondisi surut cepat	Inti material 1	19,20	20,60	1,24	36,37
	Filter material 2	18,30	21,00	0,00	34,40
	Material lulus air bagian dalam 3	18,72	21,10	0,00	35,36
	Material lulus air bagian luar 4 dan 5	18,98	21,40	0,00	47,70
	Material lulus air bagian luar 6	18,98	21,40	0,00	51,20
	Material lulus air bagian luar 7	18,98	21,40	0,00	59,60

Tabel B.3 - Hasil analisis stabilitas lereng bendungan Jatibarang

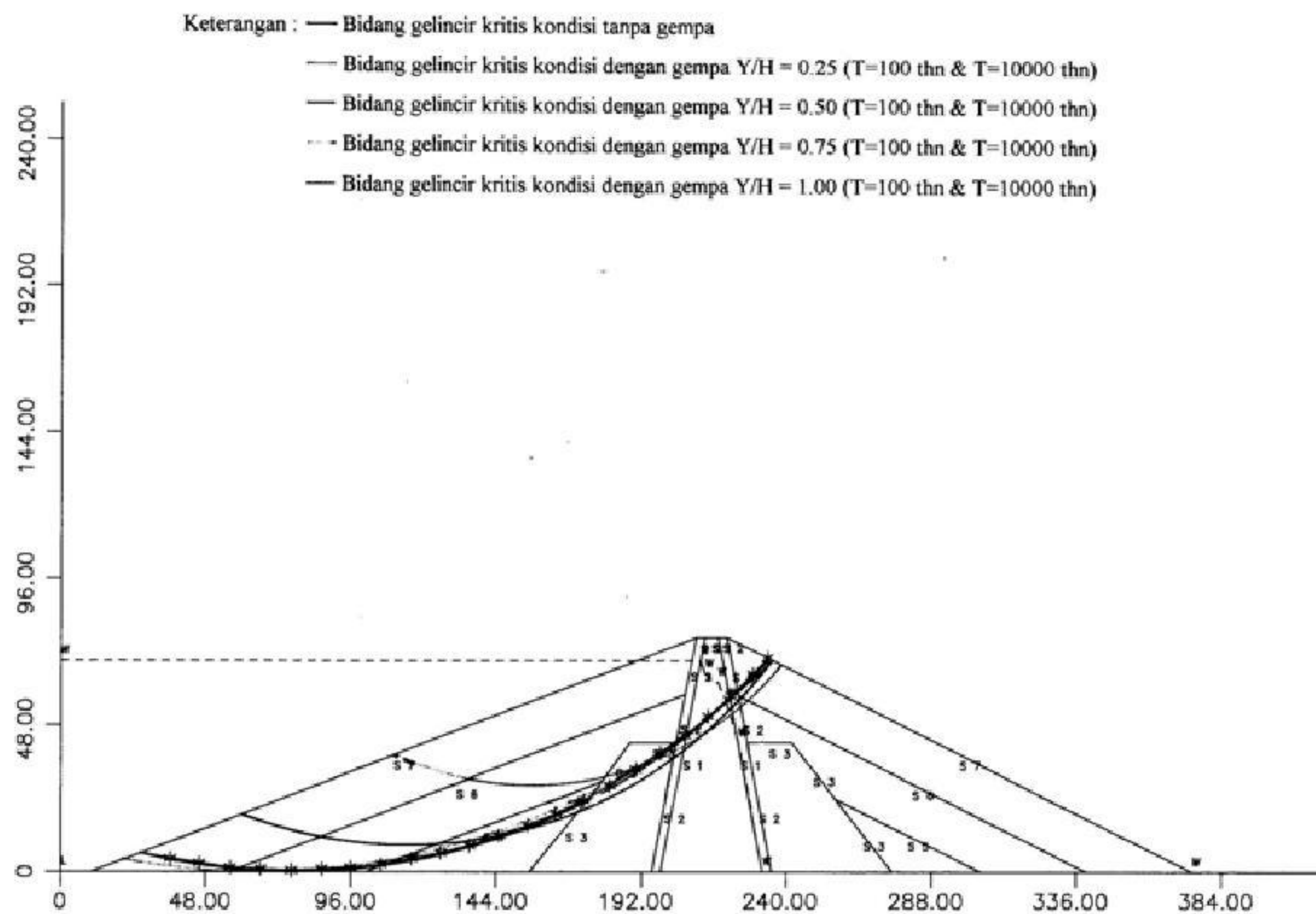
Kondisi pembebanan	Lereng	Tanpa gempa	
		F K	F K m i n
Selesai konstruksi	Udik	3,509	1,30
	Hilir	2,707	1,30
Aliran langgeng	Udik	3,44	1,50
	Hilir	2,707	1,50
Surut cepat	Udik	2,835	1,20



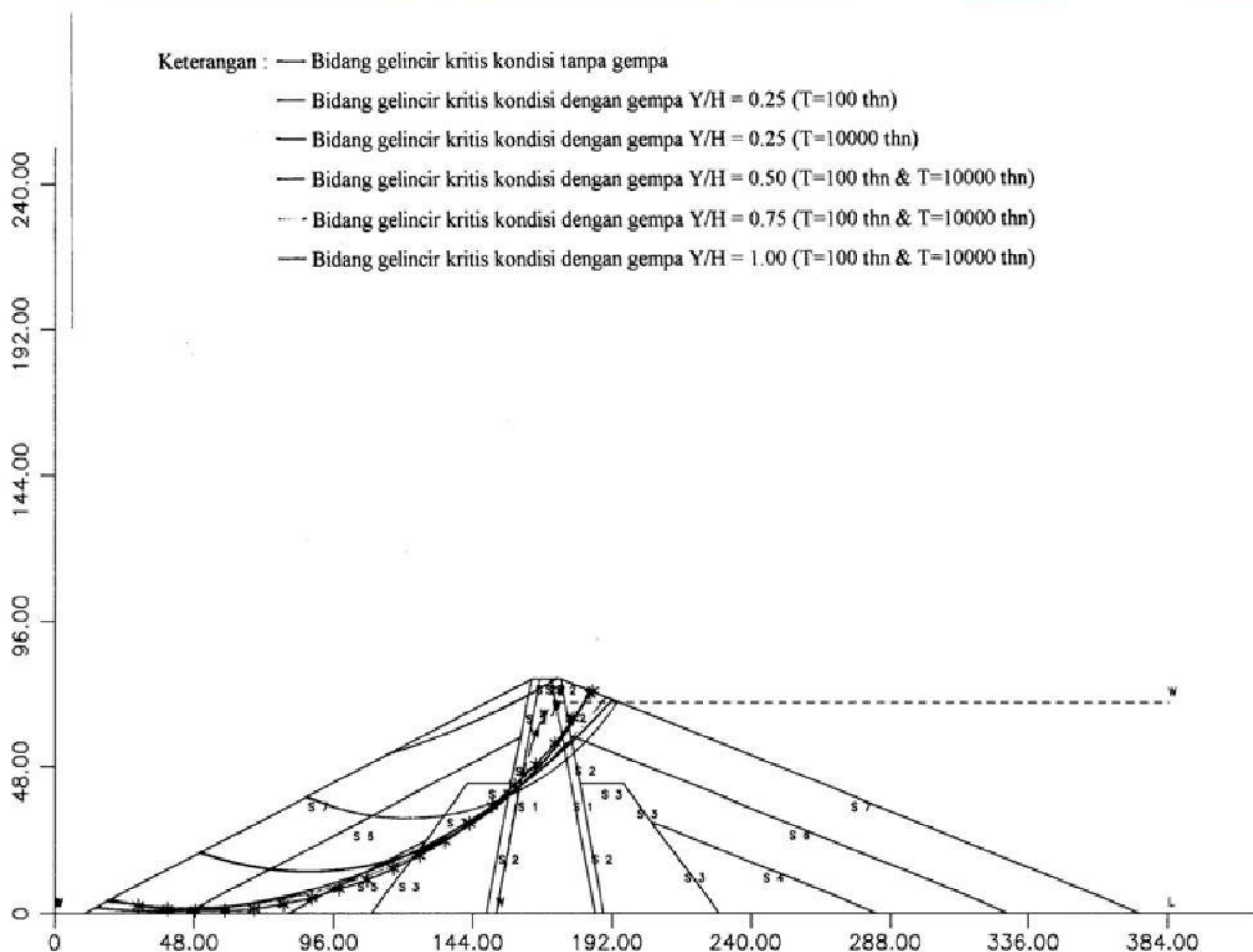
Gambar B.11 - Hasil analisis stabilitas lereng udik selesai konstruksi



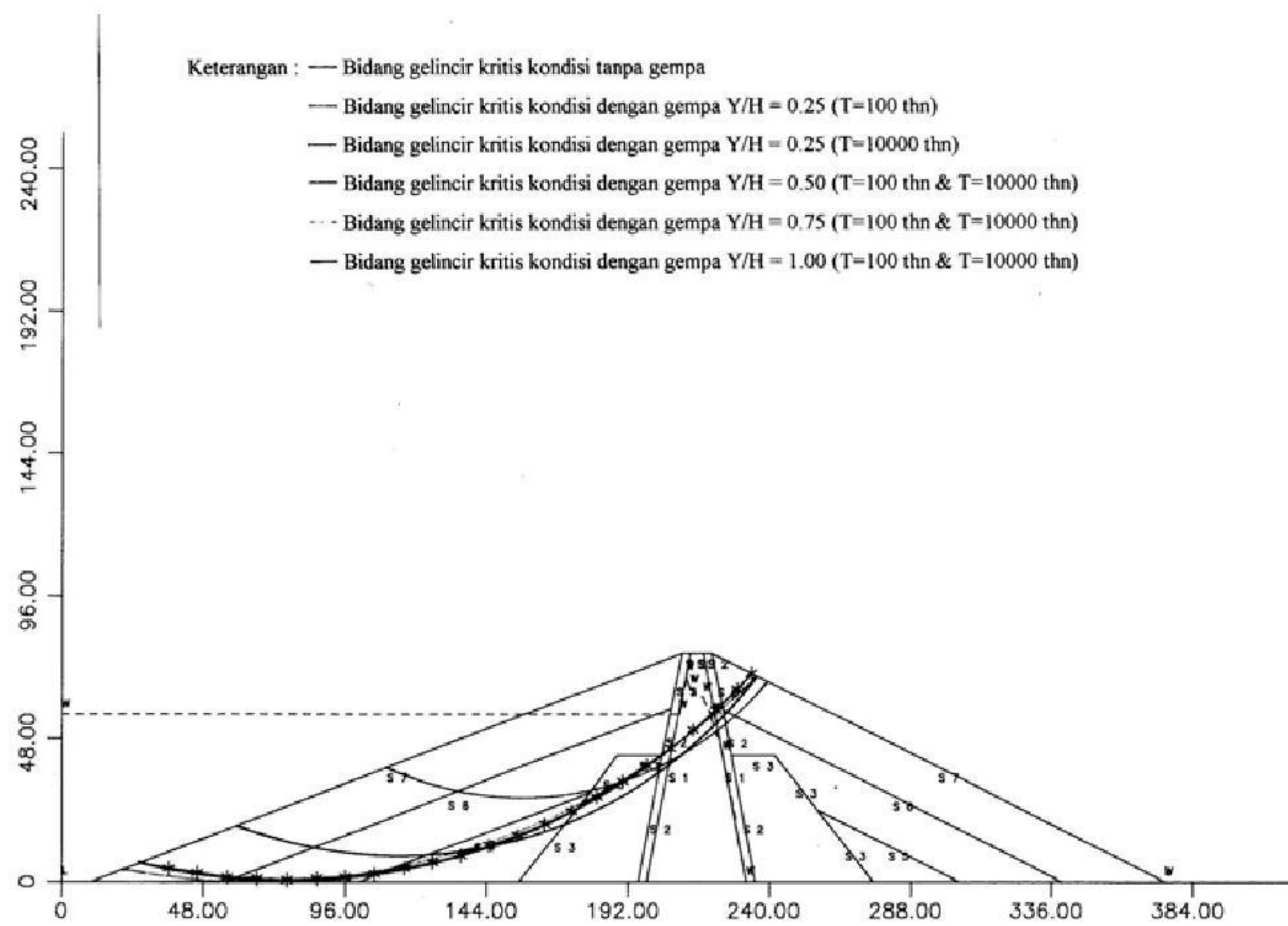
Gambar B.12 - Hasil analisis stabilitas lereng hilir selesai konstruksi



Gambar B.13 - Hasil analisis stabilitas lereng udik kondisi aliran langgeng

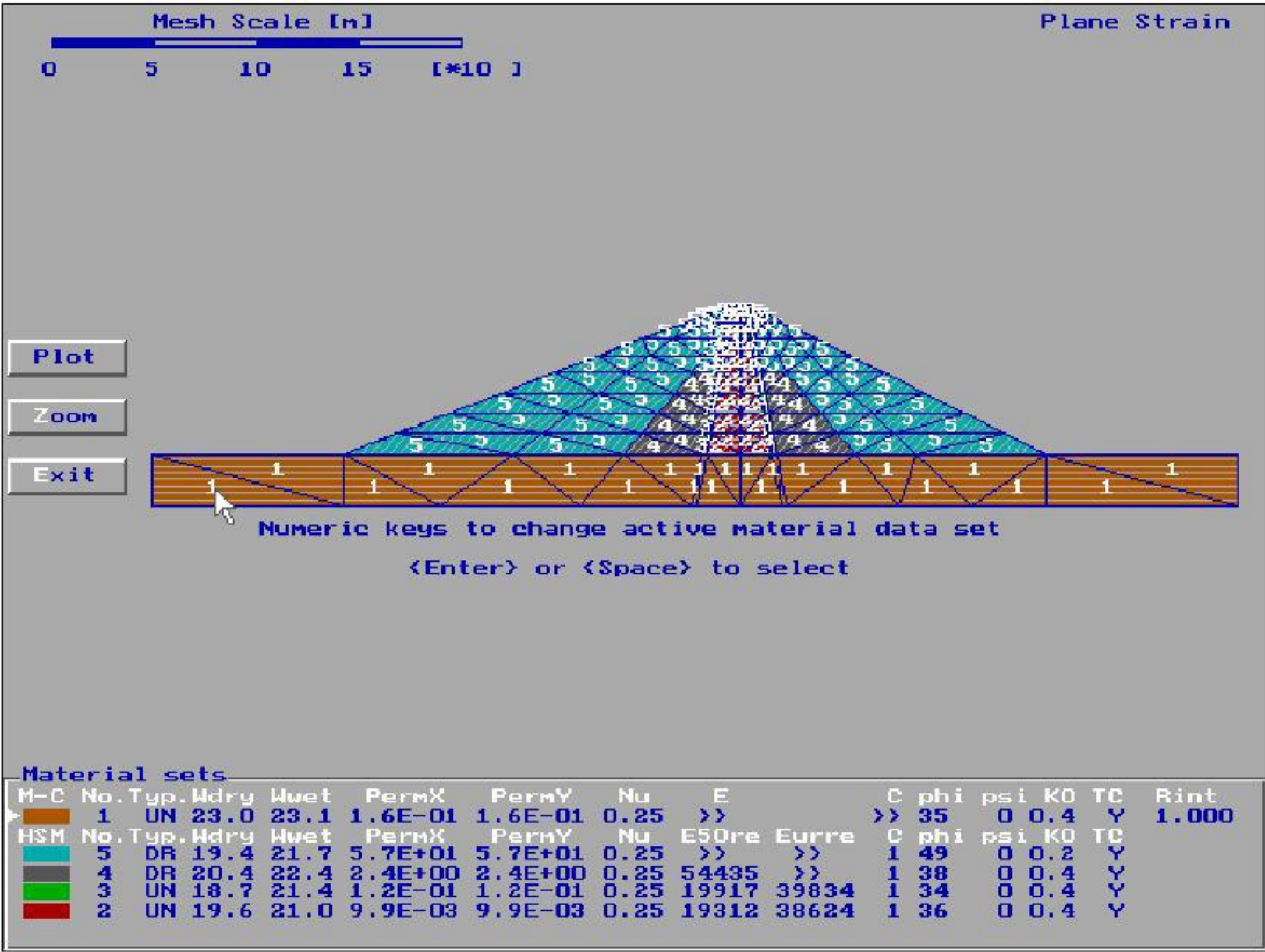
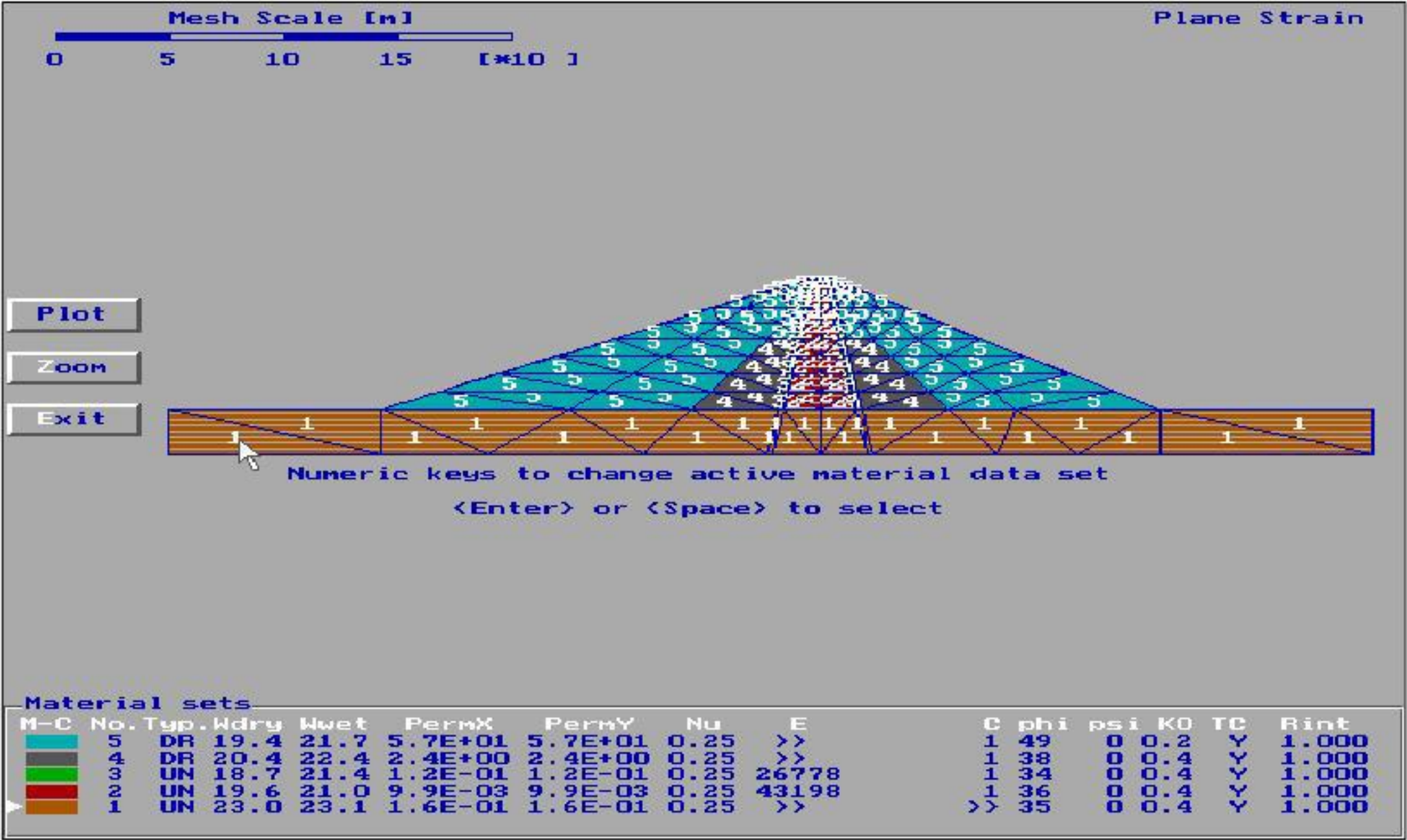


Gambar B.14 - Hasil analisis stabilitas lereng hilir kondisi aliran langgeng

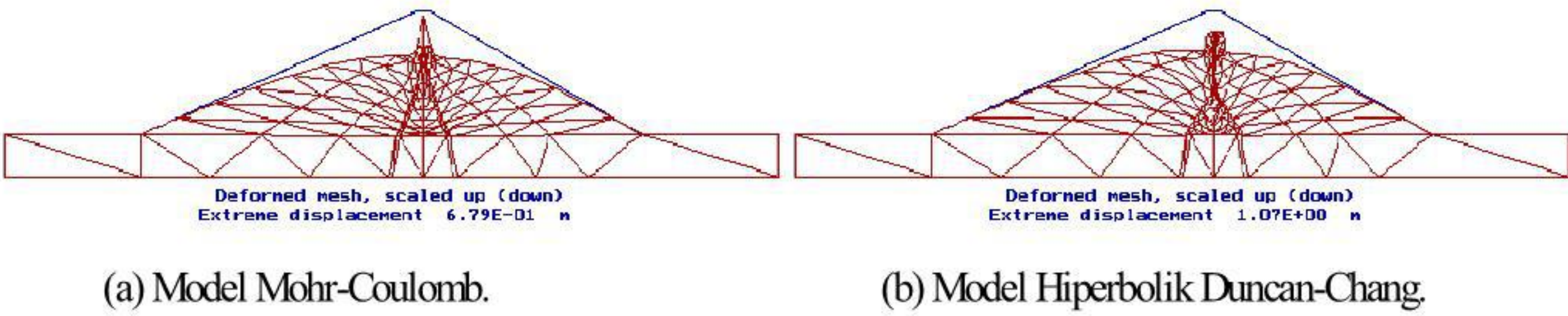


Gambar B.15 - Hasil analisis stabilitas lereng udik kondisi surut cepat

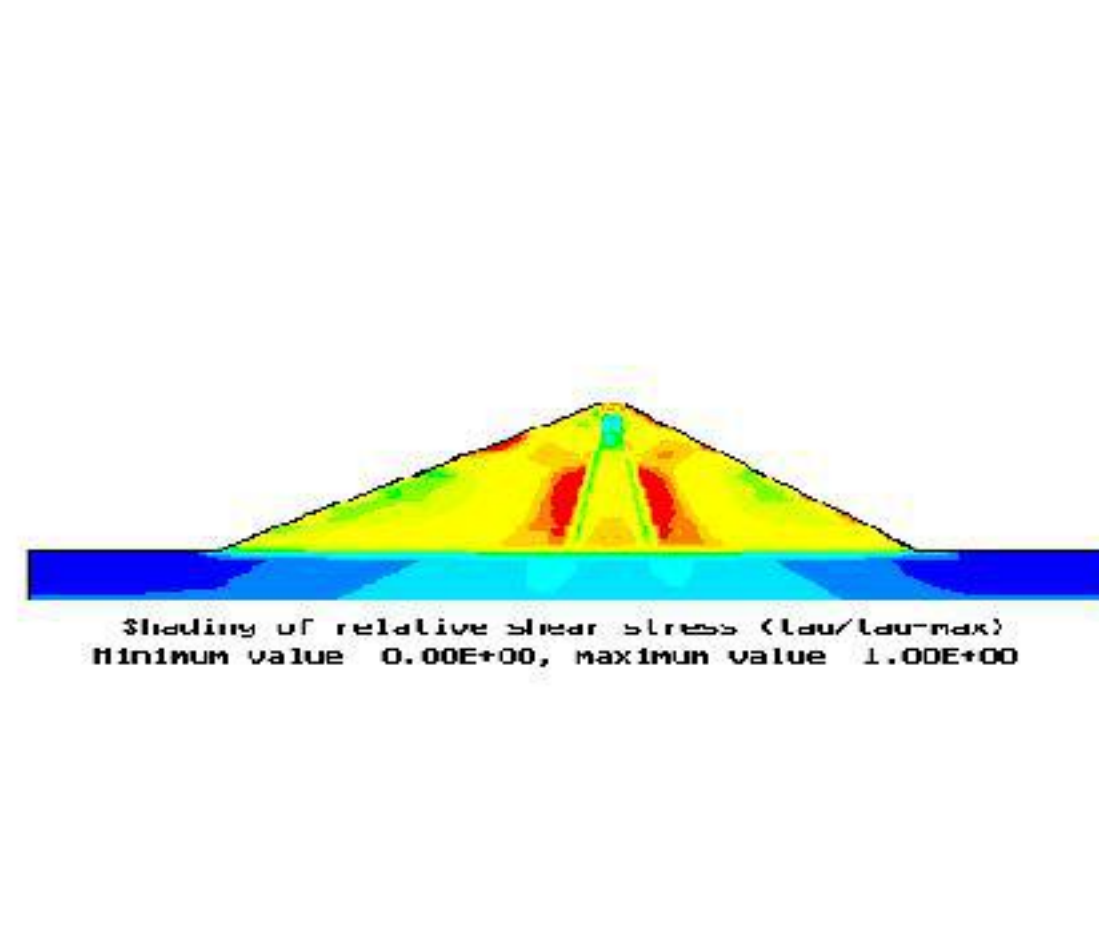




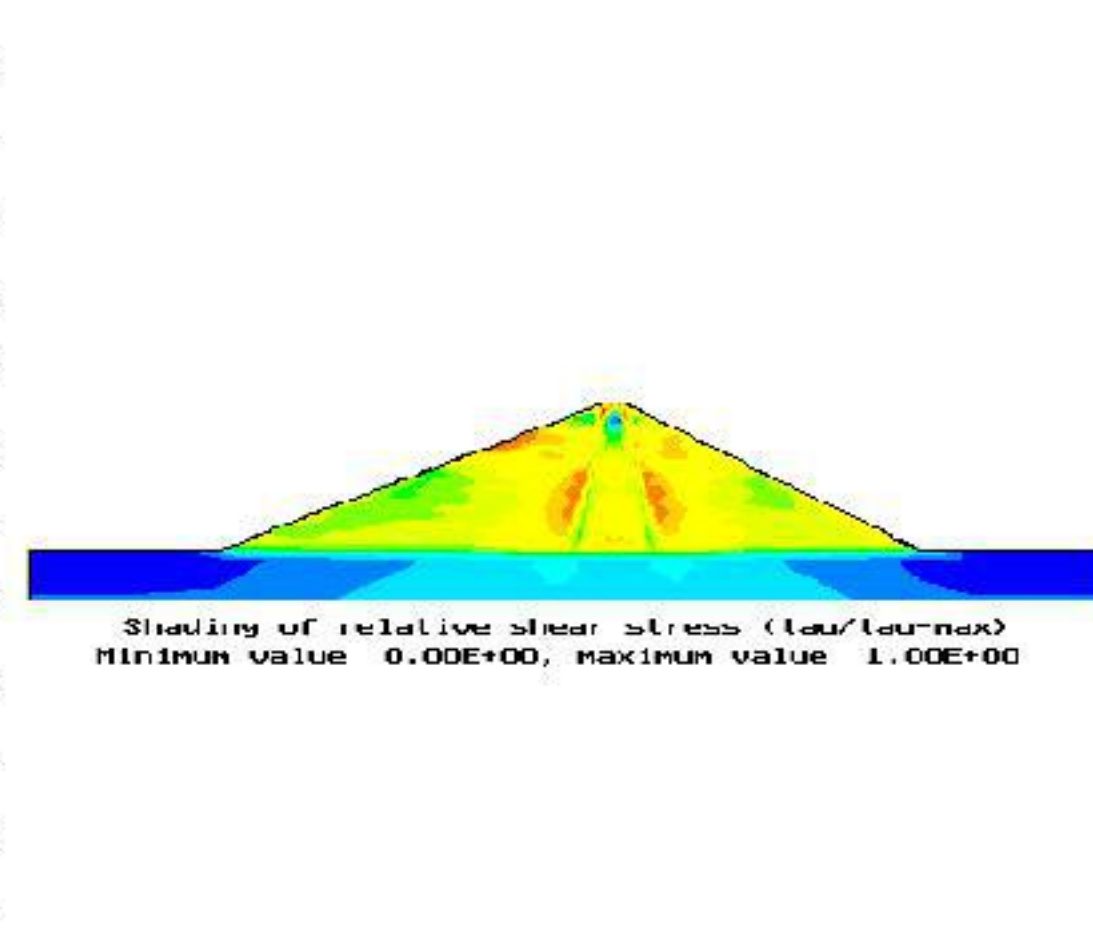
Gambar B.17 - Jenis material model hiperbolik untuk analisis tegangan regangan



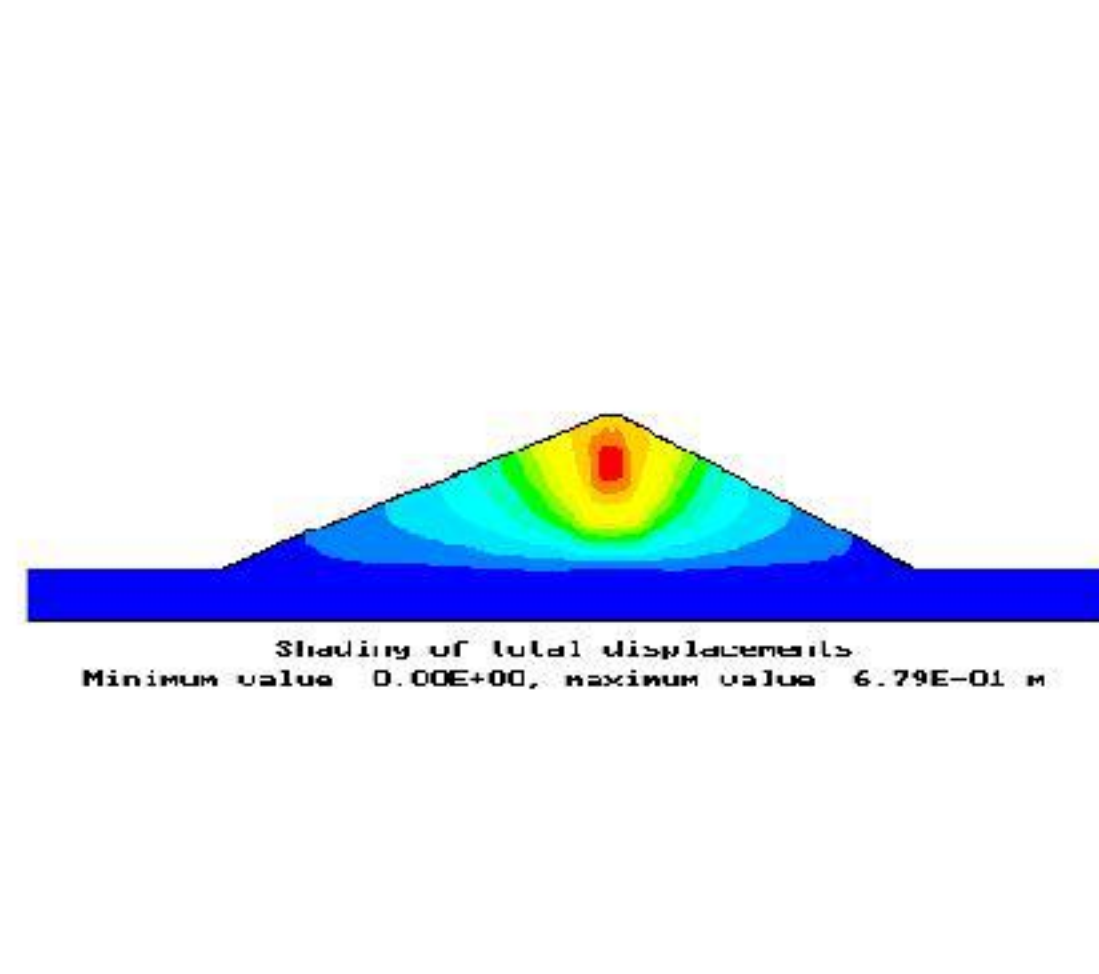
Gambar B.18 - Deformasi jaring elemen hingga kondisi selesai konstruksi



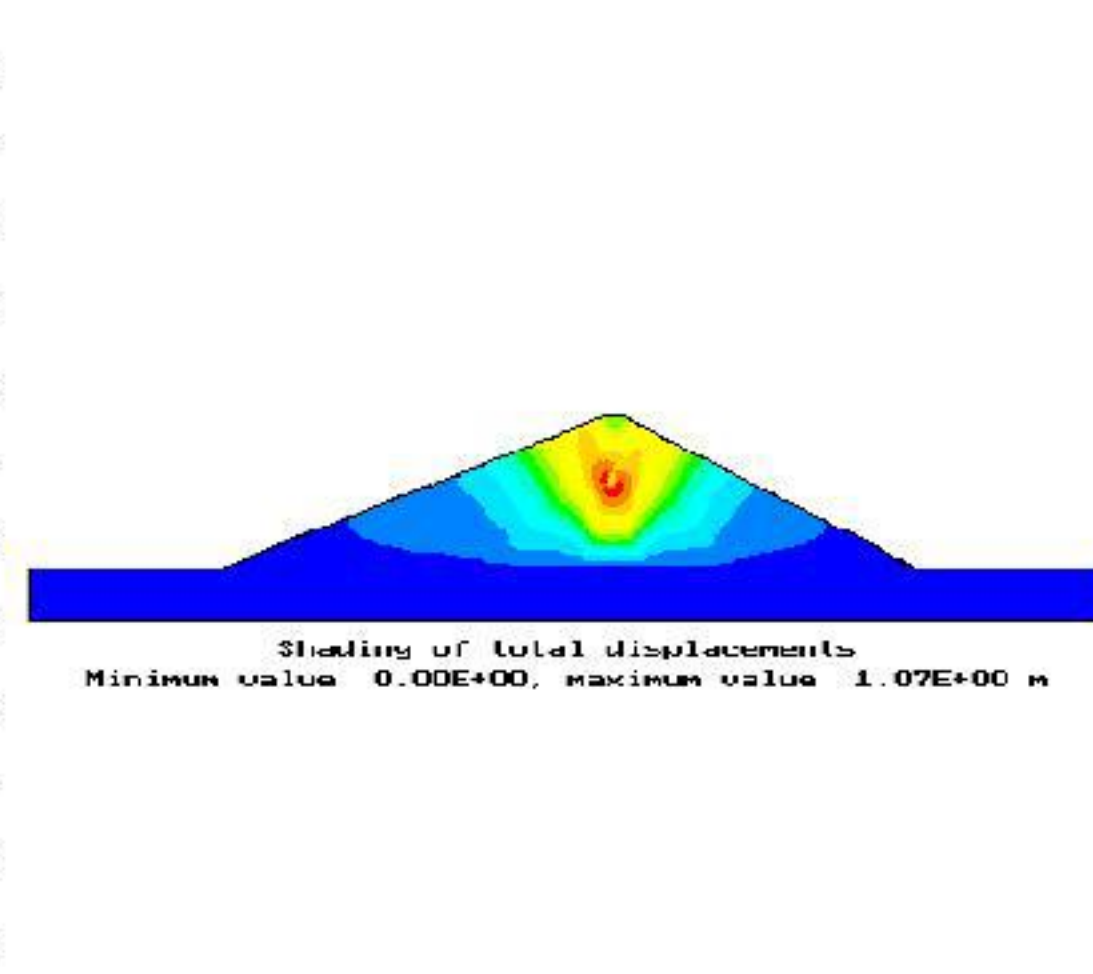
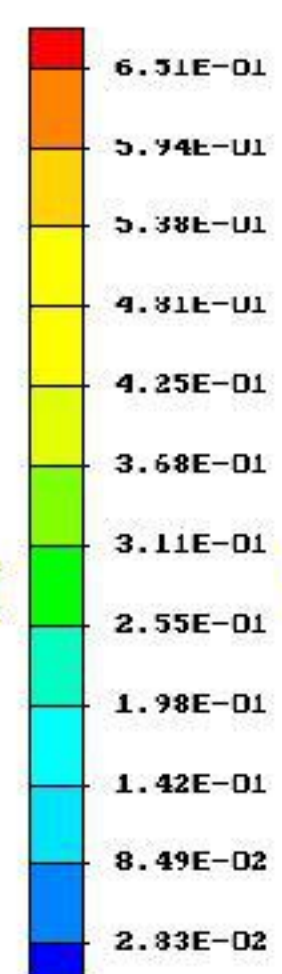
(a) Model Mohr-Coulomb.



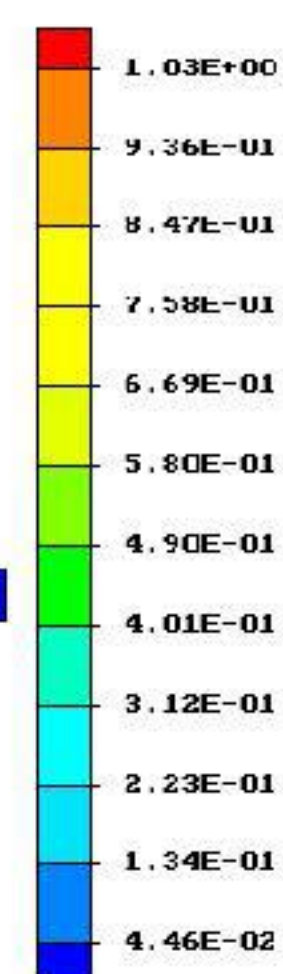
(b) Model Hiperbolik Duncan-Chang.



(a) Model Mohr-Coulomb.



(b) Model Hiperbolik Duncan-Chang.



Bibliografi

- Bharat Singh and Sharma, H.D. (1976), "*Earth and Rockfill Dams*", Sarita Prakashan, Nauchandi Meerut, India, June 1976
- Bureau of Reclamation (1977), "*Design of Small Dams*", Denver Colorado, 1977.
- Bureau of Reclamation (1987), "*Static Stability Analysis*", Design Standards Embankment Dams No.13, United States Dept. of The Interior, Bureau of Reclamation, Engineering and Research Center, Denver Colorado, August 1987.
- Casagrande, A. (1940), "*Seepage Through Dams*", Contribution to Soil Mechanics 1925-1940, Boston Society of Civil Engineers, Boston, Mass., 1940, pp 295-336.
- Cedergren, H. (1967), "*Seepage , Drainage and Flownets*", John Wiley and Sons, Inc., New York, 1967, pp. 158-169.
- Geosoft (1992), "*Stabl/G -Slope Stability Analysis Simplified Janbu, Simplified Bishop or Spencer's Method of Slices*", An Engineering Analysis Program for Geotechnical Engineers, 1442 Lincoln Avenue Suite 146. Orange, Ca 92665. USA (714) 496-8861, Copyright 1992 Geosoft.
- Geo-slope (1995), "*User's Guide -Slope/W for Slope Stability Analysis Version 3*", Geoslope International Ltd, Calgary, Alberta, Canada.
- Hilf, J.W. (1961), "*Estimating Pore Water Pressure in Earth Embankments -Construction Stage*", Design Notes on Earth Dams, Bo.2 Bureau of Reclamation, Denver, May 1961.
- Karpoff, K.P.(1954), "*Pavlosky's Theory of Phreatic Line and Slope Stability*", American Society of Civil Engineers, No.386, Jan. 1954.
- Najoan, Th. F. (1993), "*Sifat-sifat teknis bahan timbunan tanah di Indonesia*", Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pengairan No.29-TH KWIII, 1993.
- Suyono Sosrodarsono and Kansaku Takeda, Editor (1977), "*Bendungan Type Urugan*", PT Pradnya Paramita Jakarta, 1977
- Vermeer, P.A. and Brinkgreve, R.B.J., (1995), "*Plaxis Finite Element Code For Soil and Rock Analysis* ", A.A. Balkema , Rotterdam , Brookfield, 1995.